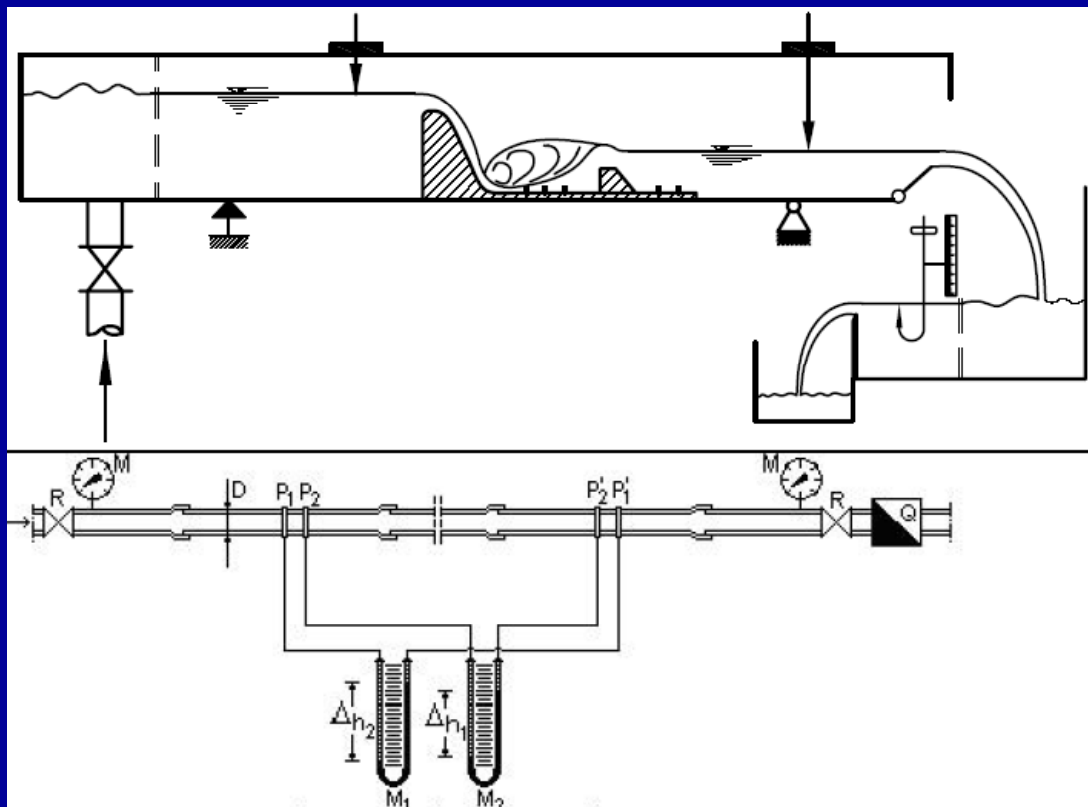


I. Bartha
N. Marcoie

M. Luca
M. Agafiței

Hidraulică

Îndrumar de laborator



Editura POLITEHNIUM

a Universității Tehnice „Gh.Asachi” din Iași
Bd. Dimitrie Mangeron, nr.67,
RO-700050 Iași, România
Tel/Fax: 40 232 – 231343

Editura Politehniunum (fostă „Gh.Asachi”) este recunoscută de
Consiliul Național al Cercetării Științifice
din Învățământul Superior (CNCSIS)

Referenți:

Prof. univ. dr. ing. Vasile JAVGUREANU
Universitatea Tehnică Chișinău
Prof. univ. dr. ing. Dănuț ZAHARIEA
Universitatea Tehnică „Gh. Asachi” Iași

Director editură:

Prof. univ. dr. ing. Mihail VOICU

Redactor:

Ing. Elena MATCU-ZBRANCA

Răspunderea pentru tot ceea ce conține prezenta carte aparține
în întregime autorului (autorilor) ei.

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
Hidraulica: îndrumar de laborator/ Iosif Bartha, Mihail Luca,
Nicolae Marcoie, Marius-Mihai Agafiței – Iași: Editura
Politehniunum, 2006

Bibliografie

242pag ;17x24; 185ex.

ISBN (10)973-621-144-4; ISBN (13)978-973-621-144-7

- I. Bartha, Iosif
- II. Luca, Mihail
- III. Marcoie, Nicolae
- IV. Agafiței, Marius-Mihai

532(075.8)(076.5)

Printed in Romania

Lucrarea este finanțată de GRANT CNCSIS.

PREFAȚA

Îndrumarul de laborator a fost întocmit în conformitate cu programa analitică a disciplinei de Hidraulică predată pe parcursul a două semestre la secțiile de ingineri din facultatea de Hidrotehnică, pentru specializările de Inginerie Civilă și Ingineria Mediului. De asemenea, o serie de lucrări sunt tratate la secțiile de Master și la cursurile postuniversitare desfășurate în cadrul facultății.

Îndrumarul constituie o reeditare a ediției din anul 1979 coordonată de profesor Ecaterina Blidaru, dar cu o serie de îmbunătățiri și extindere a tematicii lucrărilor de laborator. Tot odată, îndrumarul răspunde cerințelor dezvoltării tehnice actuale în domeniul hidraulici aplicate, în special în hidrotehnică, a îmbunătățirii bazei materiale a laboratorului, a extinderii ariei de cercetare, a experienței dobândite de autori, precum și a utilizării metodelor noi de prelucrare și interpretare a datelor experimentale.

Îndrumarul conține un număr de 30 lucrări de laborator prezentate în succesiunea de abordare dată de planul calendaristic al cursului de Hidraulică (proprietăți fizice ale fluidelor, elemente de hidrostatică hidrocinematică și hidrodinamică, curgeri sub presiune, curgeri cu nivel liber, hidraulica instalațiilor și construcțiilor hidrotehnice, curgeri prin medii poroase, probleme speciale de hidraulică etc.).

Fiecare lucrare prezintă într-o succesiune logică partea teoretică sub o formă sintetică, descrierea bazei materiale, modul de realizare a experimentelor, modul de prelucrare și interpretare analitică și grafo-analitică a rezultatelor. Fiecare lucrare este prevăzută în detaliu cu partea de prelucrare a datelor primare, de interpretare a datelor calculate și de extragere a concluziilor. În acest scop sunt prevăzute tabele de colectare a datelor, de calcul a parametrilor și de obținere a corelațiilor specifice.

Prin conținut și forma de tratare a lucrărilor de laborator, îndrumarul răspunde în mod direct problemelor întâlnite în practică în domeniul funcționării construcțiilor și instalațiilor hidrotehnice. Lucrările valorifică baza materială a laboratorului, dotarea cu aparatură de măsură și prelucrare a datelor. Autorii recunosc că unele fenomene hidraulice nu pot fi abordate experimental datorită absenței unor dotări specifice, dar în viitor prin

valorificarea disponibilităților laboratorului și a unor surse financiare se va extinde și aprofunda aria de cercetare.

Îndrumarul de laborator răspunde unor cerințe importante și principale în pregătirea viitorului inginer hidrotehnist, deoarece prin cercetări experimentale sistematice de laborator și teren, poate cunoaște în detaliu complexitatea fenomenelor hidraulice, evoluția lor și influența acestora asupra construcțiilor și mediului înconjurător. Tot odată, poate determina interdependența parametrilor funcționali specifici fenomenelor hidraulice în cadrul construcțiilor și instalațiilor hidrotehnice în scopul obținerii datelor de proiectare, execuție și exploatare a acestora.

Pentru a facilita modul de preluare a datelor primare din experimente și a le prelucra conform cerințelor impuse de fiecare lucrare de laborator sunt prezentate în mod sintetic o serie de elemente referitoare la procesul de măsurare a mărimilor fizice, unitățile de măsură utilizate, erorile ce apar în măsurări cu modul de calcul al acestora și prelucrarea rezultatelor experimentale. Elemente de acest tip sunt prezentate în mod sintetic având în vedere însușirea lor și la unele discipline premergătoare cursului de Hidraulică.

Pentru a înlesni utilizarea îndrumarului de laborator sunt atașate un număr de anexe care prezintă o serie de noțiuni, parametri, coeficienți și valori caracteristice pentru mărimi utilizate în cercetarea hidraulică, precum și la prelucrarea și interpretarea rezultatelor experimentale.

Autorii

CUPRINS

Instrucțiuni de protecția muncii	7
Metode și mijloace de măsurare. Prelucrarea rezultatelor experimentale	10
Lucrarea 1. Proprietățile fizice ale lichidelor	28
Lucrarea 2. Metode și aparate de măsurarea presiunilor	42
Lucrarea 3. Forța hidrostatică pe o suprafață plană	53
Lucrarea 4. Echilibrul relativ de rotație	68
Lucrarea 5. Plutirea corpurilor	62
Lucrarea 6. Vizualizarea și verificarea ecuației lui Bernoulli la un sistem de conducte sub presiune	67
Lucrarea 7. Măsurarea presiunii de impact, vitezei și debitului cu tubul Pitot-Prandtl	74
Lucrarea 8. Măsurarea debitului pe conducte prin metoda strangulării secțiunii vânei de lichid	79
Lucrarea 9. Aplicații ale legii lui Bernoulli. Butelia Mariotte. Ejectorul	84
Lucrarea 10. Determinarea reacțiunii datorită impulsului la ieșirea apei dintr-o conductă	91
Lucrarea 11. Măsurarea debitului pe conducte cu debitmetrul cot	96
Lucrarea 12. Determinarea numărului critic Reynolds	101
Lucrarea 13. Măsurarea debitului în conducte sub presiune prin utilizarea contoarelor (apometrelor)	106
Lucrarea 14. Determinarea experimentală a pierderilor de sarcină distribuite (liniare) unitare și a coeficientului de rezistență liniară λ	112
Lucrarea 15. Determinarea coeficientului de pierdere de sarcină locală ζ la o vană sertar	121
Lucrarea 16. Determinarea experimentală a caracteristicii hidraulice a conductelor scurte	128
Lucrarea 17. Curgerea lichidelor prin orificii și ajutaje. Determinarea experimentală a coeficienților de viteză ϕ , contractie ϵ și debit μ	133
Lucrarea 18. Curgerea lichidelor prin orificii mari. Folosirea orificiilor mari de stavilă ca debitmetre	140
Lucrarea 19. Determinarea timpului de golire a unui lac de acumulare	145

Lucrarea 20. Determinarea experimentală a caracteristicilor jetului de lichid	150
Lucrarea 21. Determinarea experimentală a parametrilor hidraulici ai deversoarelor	155
Lucrarea 22. Determinarea experimentală a coeficientului lui Chézy (C) și de rugozitate (n), pentru albii prismatice	173
Lucrarea 23. Determinarea experimentală a distribuției vitezei în albii prismatice. Determinarea debitului prin integrarea epurii vitezelor	179
Lucrarea 24. Determinarea experimentală a parametrilor curbei de remu la ieșirea curentului de sub o stavilă	186
Lucrarea 25. Determinarea experimentală a parametrilor saltului hidraulic	194
Lucrarea 26. Racordarea biefurilor la curgerea peste un baraj deversor. Disipatori de energie	202
Lucrarea 27. Studiul mișcărilor potențiale prin analogia Helle-Shaw	208
Lucrarea 28. Determinarea experimentală a conductivității hidraulice în medii poroase	213
Lucrarea 29. Determinarea experimentală a parametrilor mișcării gradual variate a apelor subterane	222
Lucrarea 30. Trasarea spectrului hidrodinamic prin metoda analogiei electro-hidrodinamice	227
Bibliografie.....	234
ANEXE.....	236

INSTRUCȚIUNI DE PROTECȚIA MUNCII

1. CONSIDERAȚII GENERALE

Instrucțiunile de protecția muncii privind efectuarea lucrărilor de laborator la disciplina “Hidraulică” din cadrul Catedrei de Hidroameliorații și Protecția Mediului au fost întocmite în baza Legii nr. 90/1996 și a normelor metodologice de aplicare. De asemenea, s-au luat în considerare și Normele de protecția muncii specifice lucrărilor de laborator efectuate în cadrul Catedrei de Hidroameliorații și Protecția Mediului.

2. ATRIBUȚII ȘI RĂSPUNDERI

Conducătorul lucrărilor de laborator răspunde de aplicarea și respectarea legislației, a normelor și instrucțiunilor de protecția muncii din cadrul laboratorului și a normelor PSI. Conducătorul lucrărilor de laborator are următoarele atribuții și răspunderi:

- Organizarea și conducerea activităților experimentale din laborator, cu asigurarea unor condiții nepericuloase de lucru și a unor măsuri pentru preîntâmpinarea accidentelor de muncă și a bolilor profesionale;

- Instruirea teoretică a studenților la locul de efectuare a lucrărilor la începutul anului universitar. La începutul fiecărui ciclu de lucrări se va efectua instruirea practică a studenților conform unui grafic aprobat de șeful catedră. În mod deosebit, se va realiza instruirea studenților înaintea fiecărei lucrări de laborator care prezintă un grad de pericol ridicat. Efectuarea și însușirea normelor de protecție a muncii și PSI de către studenți se va consemna într-o fișă colectivă de instructaj contrasemanată. Studenții care din diferite motive nu au participat la instructaj vor fi instruiți imediat după prezentarea la primul laborator.

- Urmărirea aplicării legislației și a instrucțiunilor în problema accidentelor de muncă.

Cadrul didactic care conduce lucrarea experimentală răspunde de aplicarea legislației și a instrucțiunilor privind accesul în laborator a personalului salariat, a studenților și a străinilor. Studenții și străinii au acces în

laborator numai cu aprobarea șefului de catedră sau a șefului de disciplină, care hotărăște accesul liber sau numește un însoțitor instruit.

În zona de efectuare a lucrărilor experimentale trebuie să fie amplasate mijloace de propagandă vizuală și auditivă, pentru ca studenții să-și însușească și să respecte măsurile de protecția muncii, igienă și pază contra incendiilor.

Obligațiile principale a celor instruiți privind normele de protecția muncii și PSI sunt următoarele:

- să înștiințeze conducătorul locului de efectuare a lucrărilor practice (șef de disciplină, șef de catedră) de producerea accidentului; dacă accidentatul nu este în măsură să o facă, obligația revine martorilor oculari;

- să nu modifice starea de fapt rezultată din producerea accidentului;
- să cunoască teoretic și practic și să aplice metodele de prim ajutor în caz de accident;

- să știe unde sunt trusele și posturile de prim ajutor, cine sunt responsabilii instruiți în acest scop și unde este personalul medical la care trebuie să se adreseze în caz de urgență;

3. INSTRUCȚIUNI DE PROTECȚIA MUNCII SPECIFICE LUCRĂRILOR DE LABORATOR LA DISCIPLINA “HIDRAULICĂ” EFECTUATE ÎN CATEDRA DE HIDROAMELIORAȚII ȘI PROTECȚIA MEDIULUI

În cadrul Laboratorului de Hidraulică, precum și în celelalte laboratoare ale catedrei trebuie respectate o serie de măsuri specifice NTSM și PSI pentru evitarea pericolului de producere a accidentelor sau de degradare a instalațiilor experimentale. În acest scop se va urmări:

Punerea în funcțiune a instalațiilor experimentale se face numai cu aprobarea conducătorului de lucrări, și numai după însușirea indicațiilor din referatul de laborator sau a indicațiilor date de conducătorul lucrării.

Se interzice folosirea instalațiilor electrice de forță sau de lumină improvizate, cu defecte, modificări și în general a celor care nu prezintă siguranță în funcționare. Nu se vor utiliza instalații acționate electric care nu sunt legate la circuitul de împământare a laboratorului.

Pornirea instalațiilor acționate electric se face numai după studiul corespondenței dintre inscripționarea consumatorului și cea a întrerupătorului care-l deservește.

Instalațiile electrice prevăzute cu întrerupătoare tip DITA se pornesc apăsând ușor pe butonul negru al acestuia și se opresc prin apăsarea butonului roșu.

Instalațiile prevăzute cu cuplaje aflate în mișcare (grupuri de pompare) trebuie să fie prevăzute cu apărători de protecție. Este interzis lucrul la astfel de cuplaje sau staționarea în dreptul lor în timpul funcționării dacă nu sunt prevăzute cu protecții.

Este interzisă manevrarea bruscă a armăturilor de închidere sau reglare a circuitelor hidraulice. Manevra bruscă a robinetelor conduce la apariția fenomenului de șoc hidraulic, iar efectul acestuia constă în avaria unor elemente ale sistemului hidraulic și implicit producerea unor accidente de muncă.

Pornirea pompelor centrifugale și radiale se realizează prin pornirea pompelor cu robinetul de pe refulare închis, pentru a evita suprasolicitarea motorului electric.

Utilizarea în măsurători a manometrelor cu mercur sau defecte, cu pierderi de mercur, cu emisii de vapori de mercur este interzisă. Mercurul este foarte dăunător organismului. Remedierea manometrelor cu mercur se face numai de personalul specializat al laboratorului.

Este interzisă acționarea întrerupătoarelor, sau a organelor de închidere de la alte instalații hidraulice decât cele pe care se efectuează lucrarea de laborator. Nerespectarea acestei dispoziții poate produce pornirea unor instalații neverificate funcțional, deteriorarea aparaturii de măsură sau a unor elemente componente a instalației. De asemenea pot fi produse accidente, distrugerii ale laboratorului prin inundare etc.

La efectuarea experimentelor este interzisă folosirea aparaturii de măsurare defectă, neverificată metrologic, descompletată etc. Datorită unor indicații greșite se pot produce avarii ale instalațiilor, precum și producerea de accidente.

Pentru prevenirea incendiilor se interzice flacăra deschisă în zona de efectuare a experimentelor.

În cadrul laboratorului și a clădirii este interzis fumatul. Fumatul este permis doar în locurile special amenajate în exteriorul clădirii.

Capitolul 1

METODE ȘI MIJLOACE DE MĂSURARE. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

1.1. ELEMENTE DE ANALIZĂ DIMENSIONALĂ

1.1.1. Mărimi fizice și relații între acestea

Un fenomen fizic supus experimentării este caracterizate prin mai multe mărimi fizice ce reflectă aspectele sale calitative și cantitative. Între mărimile fizice se stabilesc o serie de relații fizice, care reflectă anumite legi obiective din natură.

O mărime fizică oarecare „a” se exprimă prin valoarea sa numerică „A” înmulțită cu unitatea de măsură „u”, conform relației:

$$a_i = A_i u_i. \quad (1.1)$$

Între mărimile fizice se pot realiza operații matematice. Adunarea a două mărimi fizice de aceeași natură, în condiția exprimării lor prin aceeași unitate de măsură, se face conform următoarei reguli:

$$a_1 + a_2 = A_1 u + A_2 u = (A_1 + A_2) u. \quad (1.2)$$

Pentru a înmulți două mărimi fizice oarecare se aplică regula:

$$a_1 a_2 = (A_1 u_1)(A_2 u_2) = (A_1 A_2)(u_1 u_2). \quad (1.3.)$$

Pentru a împărți două mărimi fizice oarecare se aplică regula:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{(A_1 u_1)}{(A_2 u_2)} = \frac{A_1}{A_2} \frac{u_1}{u_2}. \quad (1.4.)$$

În mod asemănător se obțin relațiile de calcul și pentru celelalte operații matematice.

1.1.2. Măsura și mijloace de măsurare

A *măsura* o mărime fizică înseamnă a o compara cu o mărime de același tip considerată convențional drept unitate. Procesul de comparare se numește *măsurare*. Rezultatul măsurării se exprimă printr-un număr care indică raportul dintre mărimea de măsurat și unitatea de măsură considerată.

Mijloacele de măsură sunt constituite din *măsur*i, *instrumente* și *aparate de măsurat*.

Măsurile sunt corpurile care materializează unitatea de măsură, fracțiunea sau multiplul acesteia. Pentru lungimi, măsura poate fi rigla de 1 m. Pentru mase se folosește kilogramul cu submultipli și multipli acestuia.

Instrumentele de măsurat sunt corpuri sau dispozitive cu care se compară în mod direct sau indirect mărimea considerată în operația de măsurare cu unitatea de măsură. Instrumentele de măsurat sunt diversificate în funcție de precizia dorită în măsurare. Spre exemplu, în cazul lungimilor, chiar măsurile pot fi folosite ca instrumente de măsurat (rigla de 1 m, ruleta de 10 m etc.), dar se pot utiliza și alte instrumente ca șublerul, micrometrul etc.

Prin aparate de măsurat se înțeleg totalitatea măsurilor, instrumentelor și dispozitivelor, reunite în vederea efectuării unei măsurători.

Măsurile și instrumentele de măsurat pot fi clasificate după modul lor de folosire, respectiv:

a. Măsuri și *instrumente tip*. Acestea au rolul de a păstra unitățile de măsură standard, reproducerea lor și verificarea celorlalte măsur

și instrumente; acestea pot fi:

- măsur
- și instrumente tip etalon;
- măsur
- și instrumente model;

b. Măsuri și *instrumente de lucru*. Acestea sunt utilizate efectiv în realizarea măsurătorilor. După locul de aplicație se clasifică astfel:

- măsurile și instrumente de laborator, utilizate în măsurători de precizie în procese experimentale;
- măsurile și instrumente tehnice (industriale) utilizate în procese de măsurare a mărimilor în industrie, construcții, agricultură etc.; acestea prezintă o precizie dată prin construcție și etalonare, de multe ori înscrisă pe instrument.

1.1.3. Unități de măsură

În procesele hidraulice experimentale se utilizează ca unități de măsură fundamentale metrul, kilogramul și secunda (tabel 1). Acestea fac parte din sistemul internațional de unități de măsură (S.I., ANEXA 1) și îndeplinesc următoarele condiții: sunt independente între ele și pot exprima univoc celelalte mărimi derivate.

Tabel 1. Unități fundamentale de măsură

Unitatea de măsură	Mărimea fizică
Metrul (m)	Lungime
Kilogramul (kg)	Masă
Secunda (s)	Timp
Amperul (A)	Intensitatea curentului electric
Gradul Kelvin (°K)	Temperatura
Candela (cd)	Intensitatea luminoasă
Molul (mol)	Cantitatea de substanță

În afara acestora se mai utilizează unități de măsură derivate, datorită unui mod mai ușor de utilizare în anumite procese tehnice. Spre exemplu, presiunea are ca unitate de măsură în S.I. pascalul ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$) și multiplul acestuia bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$); ca unități tolerate în hidraulică se folosesc: metrul-coloană-apă (mca), milimetrul-coloană-mercur (mmHg), atmosfera tehnică (at), atmosfera fizică (At), cu relațiile de transformare prezentate în ANEXA 1.

Tot odată, o serie de relații deduse în anumite perioade de timp sunt definite în sisteme vechi de măsură (CGS, centimetru-gram-secundă, MKfS, metru-kilogram-forță-secundă), sau în sistemele de măsură utilizate în unele țări care au adoptat mai târziu S.I.

România a adoptat Sistemul Internațional în anul 1961, iar din anul 1970 a devenit obligatoriu în orice ramură tehnică și domeniu de activitate al societății. Între anii 1961 și 1970 au fost tolerate și vechile sisteme de unități de măsură (CGS, MKfS, MKS). În domeniul hidraulic au fost tolerate unele unități de măsură până în anul 1980 (mmHg, mmH₂O, at, atm, torr – pentru presiuni, Poise, Stokes – pentru viscozități, CP– pentru putere).

1.1.4. Dimensiunea mărimilor fizice

Unei mărimi fizice este analizată prin următoarele: *denumirea, simbol, ecuația de definiție, valoarea numerică, unitatea de măsură și dimensiunea*.

Dimensiunea unei mărimi fizice se obține printr-o operație simbolică ce reproduce ecuația de definiție a mărimii. Aceasta ecuație este denumită *ecuație dimensională*. Dimensiunea se notează inițiala denumirii mărimii fizice folosind litere mari.

Spre exemplu, pentru mărimea fizică densitate, și în cazul particular, densitatea apei la temperatura de 10°C , respectiv $\rho = 999,73 \text{ kg/m}^3$, se obține:

- denumire: densitatea medie;
- simbol ρ ;
- ecuația de definiție:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.5)$$

- valoarea numerică: 999,73
- unitatea de măsură: kg/m^3 ;
- dimensiunea se obține prin aplicarea următoarei ecuații în care se utilizează paranteze pătrate:

$$[\rho] = \frac{[m]}{[V]} = \frac{M}{L^3} = L^{-3} M. \quad (1.6)$$

În mod asemănător se face ecuația dimensională a mărimilor interesate și care sunt verificate din punct de vedere a identității fizice.

1.1.5. Teorema omogenității

Cu ajutorul analizei dimensionale se studiază structura relațiilor fizice ce definesc diverse fenomene fizice. Prin studiu se stabilesc regulile după care sunt determinate formulele generale ale acestor relații.

Prima teoremă a analizei dimensionale poartă denumirea de *teorema omogenității* și are următorul enunț: *pentru ca o relație fizică să fie reductibilă la o relație între numere, aceasta trebuie să fie omogenă din punct de vedere dimensional în raport cu un sistem coerent de unități de măsură.*

Cu ajutorul teoremei omogenității se verifică identitatea mărimilor fizice și a relațiilor numerice dintre acestea în raport cu sistemul de unități de măsură folosit.

1.2. ERORI DE MĂSURARE

1.2.1. Erorile măsurilor și instrumentelor de măsurat

La realizarea măsurătorilor de laborator sau în procese tehnice se utilizează o serie de noțiuni specifice ce caracterizează operațiile de măsurare [Bîrglăzan, A., 1956].

Un instrument de măsurat sau o măsură are o *valoare nominală* A_n conform modului de structurare al acestuia. Valoarea nominală este înscrisă pe

instrument. Spre exemplu, rigla cu lungimea de 1,00 m atașată unui manometru diferențial are valoarea nominală de 1,00 m.

Un instrument de măsurat sau o măsură are o *valoare reală* A obținută prin compararea cu o măsură tip. Dacă la comparare în dreptul diviziunii de 1,00 m se citește pe instrumentul tip 1,005 m, rezultă valoarea reală a instrumentului de măsurat 1,005 m.

Eroarea absolută a instrumentului de măsurat ΔA rezultă din diferența dintre valoarea nominală și cea reală:

$$\Delta A = A_n - A, \quad (1.7)$$

respectiv, $\Delta A = 1,00 - 1,005 = -0,005$ m.

Corecția absolută δA a instrumentului de măsurat este egală și de semn contrar cu eroarea absolută:

$$\delta A = A - A_n, \quad (1.8)$$

respectiv $\delta A = +0,005$ m. Aceasta se adaugă valorii nominale pentru obținerea rezultatului corect a măsurării. Instrumentele de măsură utilizate în laborator trebuie să prezinte această corecție inscripționată pe corpul lor și atestată de un serviciu de metrologie.

Eroarea relativă a instrumentului de măsurat sau a măsurii este dată de raportul dintre eroarea absolută și valoarea nominală:

$$e_n = \frac{\Delta A}{A_n}, \quad (1.9)$$

sau procentual,

$$e_n \% = \frac{\Delta A}{A_n} 100, \quad (1.10)$$

respectiv, $e_n = -\frac{0,005}{1,00} = -0,005$ și $e_n \% = -\frac{0,005}{1,00} 100 = -0,5\%$.

În cazul unui instrument de lucru se definesc noțiunile: *indicația* I_n , *valoarea reală a indicației* I , *eroarea absolută a indicației* ΔI , *corecția* δI , *eroarea relativă a indicației* e , *eroarea relativă redusă a indicației* e_{red} , *eroarea admisibilă a instrumentului* e_{adm} . Valoarea nominală și indicațiile de pe scara gradată a instrumentului de lucru sunt afectate de erori, care trebuie luate în considerare în timpul măsurărilor și la prelucrarea rezultatelor acestora.

Eroarea relativă redusă a instrumentului este reprezentată de raportul dintre eroarea absolută a indicației și valoarea nominală:

$$e_{red} = \frac{\Delta I}{A_n}. \quad (1.11)$$

Eroarea admisibilă a instrumentului este dată de raportul dintre eroarea relativă maximă a indicației și valoarea nominală:

$$e_{adm} = \frac{\Delta I_{max}}{A_n}. \quad (1.12)$$

Dacă în cazul analizat anterior pentru o indicație oarecare a instrumentului de măsură $\Delta I_{max} = 5$ mm, rezultă eroarea admisibilă

$$e_{adm} = \frac{0,5}{100} = 0,005, \text{ sau procentual } 0,5\%.$$

Cu ajutorul erorii admisibile se caracterizează un instrument de măsurat, sau o măsură în privința preciziei sale. După mărimea erorilor admisibile, instrumentele de măsurat se încadrează în *clase de precizie*. Aceasta este inscripționată pe instrumentul de măsură și corespunde valorii erorii admisibile a instrumentului. În cazul analizat, clasa de precizie a instrumentului, respectiv rigla atașată manometrului diferențial este de 0,5.

În cazul instrumentelor de măsurat utilizate în laborator, împreună cu clasa de precizie mai trebuie cunoscută și curba de etalonare a instrumentului, adică trebuie cunoscute erorile absolute ale indicației pe tot parcursul scării gradate.

1.2.2. Clasificarea erorilor de măsură

Alegerea celor mai favorabile condiții de experimentare se realizează pe baza studiului erorilor de măsură. Prin efectuarea mai multor măsurări ale aceleași mărimi cu același instrument de măsurat se constată că valorile obținute diferă între ele. Diferența este datorată erorilor de măsurare.

Prin eroare de măsurare se înțelege diferența între rezultatul unei măsurări și valoarea adevărată a mărimii măsurate. Eroarea de măsurare este, în general, necunoscută, deoarece nu se cunoaște însăși valoarea adevărată a mărimii măsurate [Rumșiski, L., Z., 1974].

Erorile de măsurare se clasifică după sursa generatoare, modul lor de manifestare, modul lor de acțiune în prelucrarea rezultatelor, forma de exprimare matematică etc.

În funcție de sursa generatoare, erorile pot fi:

- erori obiective;

- erori personale; acestea sunt introduse de imperfecțiunile organelor de simț ale celui care face măsurătorile (spre exemplu, defecte de vedere);
- erori instrumentale: acestea sunt date de imperfecțiunile aparatelor și instrumentelor de măsură, de montarea acestora, de reglarea instrumentelor etc.
- erori metodice; acestea sunt introduse de utilizarea incorectă a instrumentelor de măsurat;
- erori exterioare; mediul exterior poate influența prin variații de temperatură, de cantitatea de umiditate etc., valoarea parametrilor măsurați.

După modul de manifestare, erorile se clasifică astfel:

- erori întâmplătoare;
- erori sistematice;
- erori combinate.

Măsurătorile experimentărilor pot fi măsurători *directe* sau *indirecte*.

1.2.3. Erorile sistematice

Erorile sistematice sunt introduse de calitatea și caracteristicile instrumentelor de măsurat, de caracterul greșit al metodei de măsurare sau de neluarea în considerare a unor factori exteriori cu acțiune unilaterală. Erorile sistematice apar cu regularitate la repetarea măsurătorii.

După originea lor, erorile sistematice pot fi clasificate astfel:

- erori instrumentale, determinate de deficiențele constructive ale instrumentelor de măsură; aceste erori pot fi observate odată cu verificarea mijloacelor de măsurare și eliminate prin aplicarea corecțiilor;
- erori de instalare, care provin din montarea greșită a instrumentelor de măsurat, dar și de influențele negative ale mediului de instalare; erorile de acest tip pot fi corectate prin verificarea modului de instalare și eliminate prin aplicarea unor corecții;
- erori de metodă, care apar când nu se cunoaște în mod corect metoda de măsurare; eliminarea acestora se realizează prin aplicarea corectă a metodei de măsurare specifică fiecărui instrument de măsură.

De exemplu, la determinarea debitului pe un canal cu ajutorul unui deversor se pot introduce erori prin poziția greșită a punctului de măsurare a

sarcini pe deversor (datorită aparatului) sau datorită folosirii unei constante necorespunzătoare a deversorului (caracter greșit al măsurătorii) etc.

Măsurarea presiunii, sau a diferențelor de presiune, prin utilizarea manometrelor cu lichid, poate fi eronată datorită înclinării manometrului, prin folosirea unui lichid cu impurități (densitate schimbată), neluarea în considerare a temperaturii lichidului manometric, ignorarea distanței de la punctul de priză la centrul manometrului etc.

După modul lor de apariție, erorile sistematice pot fi constante sau variabile. Erorile sistematice constante își păstrează aceeași valoare pe toată lungimea scării de măsură. Erorile sistematice variabile își schimbă valoarea pe parcursul scării de măsură în mod progresiv sau periodic.

Erorile sistematice se elimină prin verificarea aparatelor, înlocuirea instrumentelor ce introduc erori, prin studiul amănunțit al fenomenului ai căror parametri dorim să-i determinăm, cunoașterea metodologiei de efectuare a măsurătorilor etc.

1.2.4. Erorile întâmplătoare

Erorile întâmplătoare sau accidentale apar inevitabil și nu urmează o lege constantă, având valori și semne diferite pentru aceeași mărime măsurată. Aceste erori nu sunt controlabile fiind determinate de condiții și de factori de natură diferită și cu o comportare aleatoare.

Erorile întâmplătoare se determină prin aplicarea calculului probabilităților. Pe cale statistică s-a observat că la un număr mare de măsurători efectuate asupra aceleași mărimi fizice rezultă următoarele principii:

- media aritmetică a erorilor întâmplătoare tinde către zero;
- erorile pozitive au aceeași frecvență ca și cele negative;
- erorile mici sunt mai frecvente decât cele mari.

Erorile întâmplătoare se elimină prin creșterea numărului de măsurători asupra aceleași mărimi fizice și luând ca valoare a măsurării media aritmetică a rezultatelor. La media aritmetică se adună corecția (egală și de sens contrar cu eroarea absolută a instrumentului de măsură) și se obține valoarea cea mai probabilă a măsurătorii.

1.2.5. Erorile grosolane

Erorile grosolane apar inevitabil în timpul măsurărilor și sunt datorate unor cauze diverse ce țin de natura constructivă a instrumentelor de măsură, metoda de măsurare, defectele observatorului, influențele negative ale mediului de desfășurare a experimentelor etc.

Erorile grosolane prezintă valori foarte mari în comparație cu mărimea fizică măsurată, situație în care pot fi ușor observate și înlăturate.

1.3. CALCULUL ERORILOR DE MĂSURARE

1.3.1. Calculul erorilor măsurărilor directe

Repetând de “n” ori o măsurătoare “a”, se poate admite că media aritmetică “A” a rezultatelor este valoarea cea mai probabilă a mărimii fenomenului:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}. \quad (1.13)$$

Această valoare satisface condiția ca abaterea medie pătratică (sau abaterea standard) a măsurărilor să fie minimă:

$$\sigma_0 = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A - a_i)^2}{n}}, \quad (1.14)$$

unde σ_0 este abaterea medie pătratică.

Relația (1.13) presupune că toate măsurătorile s-au efectuat cu aceeași precizie. Este evident că în cele mai multe cazuri practice nu toate operațiile sunt la fel de precise, fie din cauza condițiilor exterioare în care s-au efectuat, fie că nu se poate atribui, din diferite alte cauze, tuturor operațiilor același grad de încredere. Ponderea se introduce în calcul după următorul criteriu general: cu cât rezultatele unor măsurători individuale sunt mai bune, cu atât ponderea acestora este mai mare.

Fie $a_1, a_2, \dots, a_n$ măsurătorile și, respectiv, $p_1, p_2, \dots, p_n$ ponderile acestora. În acest caz, relația (1.13) devine:

$$A = \frac{\sum_1^n a_i \cdot p_i}{\sum_1^n p_i} . \quad (1.15)$$

Comparând relațiile (1.15) cu (1.13) se observă că este ca și cum fiecare valoare “ a_i ” a fost obținută de “ p_i ” ori. Stabilirea ponderii este o operație destul de grea, uneori și se face pe baza studiului împrejurărilor în care au avut loc experiențele.

De exemplu, s-a determinat debitul de lichid (constant) printr-o conductă prin metoda volumetrică, iar rezultatele obținute au fost:

$$q_1 = \frac{V_1}{t_1}; q_2 = \frac{V_2}{t_2}; \dots; q_n = \frac{V_n}{t_n}$$

în care:

q_i este debitul calculat;

V_i – volumul de lichid măsurat;

t_i - timpul de colectare corespunzător fiecărui volum V_i .

În acest caz, media ponderată se poate scrie astfel:

$$q_{med} = \frac{\sum_1^n q_i \cdot t_i}{\sum_1^n t_i} \text{ sau } q_{med} = \frac{\sum_1^n q_i \cdot V_i}{\sum_1^n V_i} ,$$

în ideea că precizia de determinare a debitului mediu crește cu volumul de colectare sau cu timpul de colectare.

Diferența dintre valoarea medie “ A ” a mărimii măsurate și valoarea obținută la diferite măsurători se numește **eroare absolută**:

$$\varepsilon_i = A - a_i . \quad (1.16)$$

Eroarea absolută depinde de caracteristicile instrumentului de măsură.

Raportul dintre eroarea absolută și rezultatul măsurătorii se numește *eroare relativă* (δ), fiind exprimată și procentual:

$$\delta_i = \frac{\varepsilon_i}{a_i} = \frac{A - a_i}{a_i}; \delta_i = 100 \frac{\varepsilon_i}{a_i} \% . \quad (1.17)$$

Eroarea relativă depinde atât de aparatura de măsură, de obiectul măsurătorii, cât și de condițiile de lucru. Eroarea relativă dă indicații asupra preciziei măsurătorii.

Aceeași eroare absolută este reflectată diferit de eroarea relativă, în funcție de valoarea mărimii măsurate, de exemplu: dacă eroarea absolută este de 0,01 mm, în cazul diametrului unei conducte de 100 mm, eroarea relativă va fi: $\delta_i = 0,01/100 = 0,0001$. Aceeași eroare absolută obținută în cazul determinării rugozității acestei conducte, care este de 0,1 mm, atunci eroarea relativă este: $\delta_i = 0,01/0,1 = 0,1$, ceea ce arată o precizie redusă, spre deosebire de primul caz.

Pe baza teoriei erorilor întâmplătoare, s-au obținut formule pentru determinarea erorii medii pătratice a mediei aritmetice, σ_a și pentru eroarea cea mai probabilă, r_a :

$$\sigma_a = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n(n-1)}}, \quad (1.18)$$

$$r_a = 0,6745 \sigma_a. \quad (1.19)$$

Valoarea cea mai probabilă a rezultatului măsurătorii va fi exprimat prin relația:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \pm r_a. \quad (1.20)$$

1.3.2. Calculul erorilor măsurătorilor indirecte

În unele situații se determină indirect mărimea “ A ” ce se dorește a fi aflată, prin cunoașterea mărimii “ B ” și a relației:

$$A = f(B). \quad (1.21)$$

Relația (1.21) se diferențiază:

$$A + dA = f(B + dB)$$

iar din definiția diferențialei rezultă:

$$dA = \frac{df(B)}{dB} dB$$

Eroarea relativă δ_A este în acest caz:

$$\delta_A = \frac{dA}{A} = \frac{\frac{df(B)}{dB} dB}{f(B)} = \frac{df(B)}{f(B)} = d \cdot \ln f(B). \quad (1.22)$$

În mod analog, se poate scrie, în cazul $A = f(B_1, B_2, \dots)$:

$$\delta_A = \frac{dA}{A} = d \cdot \ln f(B_1, B_2, \dots, B_n), \quad (1.23)$$

iar eroarea maximă se obține prin adunarea modulelor diferențelor parțiale ale funcției $\ln f(B_1, B_2, \dots, B_n)$,

$$\delta_A = \frac{dA}{A} = \sum \left| \frac{f(B_1, B_2, \dots, B_n)}{B_i} \cdot \frac{dB_i}{f(B_1, B_2, \dots, B_n)} \right| \quad (1.24)$$

Exemplu: La determinarea debitului pe canale se utilizează deversoare de formă dreptunghiulară. În acest caz, debitul deversorului se calculează cu relația:

$$Q = K \cdot H^{3/2}, \quad Q = f(h)$$

Aplicând relația (1.22), rezultă:

$$\delta_Q = \frac{dQ}{Q} = \frac{df(h)}{f(h)} = \frac{\frac{d}{dh}(k \cdot h^{3/2})}{k \cdot h^{3/2}} dh = \frac{3}{2} \frac{dh}{h}$$

ceea ce arată că eroarea de măsurare a sarcinii pe deversor se amplifică în determinarea debitului de 1,50 ori.

1.4. DETERMINAREA CELOR MAI FAVORABILE CONDIȚII PENTRU EXPERIMENTARE

Condițiile cele mai favorabile efectuării măsurărilor vor fi atunci când erorile, respectiv erorile relative vor fi minime. Rezultă că, din punct de vedere matematic, problema se reduce la găsirea condițiilor de minim ale expresiilor (1.17), (1.22), (1.24).

Nu întotdeauna această metodă dă rezultate, întrucât nu toate funcțiile expresiilor (1.17), (1.22), (1.24) au puncte de minim pentru valori finite ale argumentului. În acest caz se pune condiția ca eroarea relativă să aibă valori sub o anumită limită (toleranță – eroare maximă admisă).

1.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Legătura între două mărimi fizice x și y poate fi exprimată sub forma:

$$y = f(x), \quad (1.25)$$

care transpusă într-un sistem de axe (carteziene, logaritmice) descrie o curbă. Funcția $y = f(x)$ poate fi definită sub formele:

- funcție constantă, $y = c$;
- funcție liniară, $y = ax + b$;
- funcție parabolică, $y = ax^n + bx^{n-1} + \dots + n$,
- funcție logaritmică, $y = \lg ax$,
- funcție exponențială, $y = a^x + b$;
- funcții mixte sau combinate.

În practica inginerescă se caută ca un fenomen să fie descris de o funcție cât mai simplă pentru o utilizare cât mai ușoară.

În analiza experimentelor hidraulice sunt utilizate în mod frecvent funcții de tip constant, liniare, parabolice și logaritmice.

Rezultatele obținute pe cale experimentală, în general, sunt centralizate în tabele: x – variabilă independentă (parametru) și y – variabilă determinată (funcție).

Rezultatele experimentale și cele prelucrate sunt reprezentate sub formă grafică într-un sistem de axe convenabile (xy), obținând așa-numitele vibrograme (punctele nu descriu exact o curbă, prezintă abateri față de acestea). Vibrogramele dau indicații asupra naturii curbelor (constantă, liniară, parabolică).

După alegerea tipului de curbă, problema prelucrării rezultatelor experimentale se reduce la aflarea coeficienților relației propuse, astfel încât suma distanțelor de la punctele experimentale la curba impusă să fie minimă.

Exemplu:

a. În cazul unei funcții tip $y = c$, valoarea atribuită lui c este media aritmetică (sau ponderată) a determinărilor.

b. În cazul funcției tip $y = ax + b$, trebuie să se determine coeficienții a și b . Cunoscând din experimentele efectuate șirul de perechi de valori (x, y), se poate scrie:

$$\{y_1 = ax_1 + b, y_2 = ax_2 + b, \dots, y_n = ax_n + b\}$$

Abaterile absolute sunt:

$$\varepsilon_i = y_i - ax_i - b.$$

Metoda celor mai mici pătrate arată că problema este determinată în cazul când suma pătratelor acestor abateri este minimă. Se poate scrie:

$$\sum_1^n \varepsilon_i^2 = \sum_1^n (y_i - ax_i - b)^2 = \min. = F(a, b). \quad (1.26)$$

Această funcție admite minim pentru:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = 0 \text{ și } \frac{\partial F}{\partial b} = 0,$$

din care rezultă:

$$\begin{aligned} a \sum x_i^2 + b \sum x_i - \sum x_i y_i &= 0 \\ a \sum x_i + nb - \sum y_i &= 0 \end{aligned},$$

de unde coeficienții a și b au forma de exprimare (1.27):

$$a = \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i y_i & \sum x_i \\ \sum y_i & n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & n \end{vmatrix}} \quad b = \frac{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i \\ \sum y_i & n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i \\ \sum x_i & n \end{vmatrix}}. \quad (1.27)$$

În mod analog se determină coeficienții pentru alte tipuri de funcții.

1.6. APLICAȚII LA PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Aplicația 1.

Pentru determinarea unui debit transportat de o conductă s-a folosit metoda volumetrică. Pentru valorile experimentale preluate prin patru măsurători (Tabel Apl. 1) se cere determinarea debitului mediu transportat.

Tabel Apl.1. – Valori măsurate și prelucrate.

Nr.	Volum, l	Timp, s	Debit, l/s
1	826,0	18,2	45,38
2	1312,0	28,7	45,71
3	350,0	7,80	44,87
4	650,0	14,3	45,45
$\sum Q_i t_i = 3138 \text{ l}, \sum t_i = 69,0 \text{ s}$			

Rezolvare: Debitul s-a calculat cu relația:

$$Q = \frac{V}{t},$$

iar rezultatele au fost transcrise în tabel, în coloana a patra.

Prin aplicarea relație mediei aritmetice ponderate (1.15) se obține:

$$Q_{med} \frac{\sum Q_i t_i}{\sum t_i} = \frac{3138}{69} = 45,48 \text{ l/s}.$$

Aplicația 2.

Pentru datele măsurate și prelucrate de la Aplicația 1, să se determine eroarea absolută, eroarea relativă a fiecărei măsurători, precum și valoarea cea mai probabilă a măsurătorilor.

Rezolvare: Relațiile de calcul (1.16...1.19) se aplică în acest caz sub forma:

$$\varepsilon = Q_{med} - Q_i, \delta_i = \frac{Q_{med} - Q_i}{Q_i} = \frac{\varepsilon}{Q_i},$$

$$\sigma_a = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n(n-1)}}, r_a = 0,6745 \sigma_a$$

Datele prelucrate sunt prezentate tabelar:

Nr	Q , l/s	ε	δ , %
1	45,38	0,10	0,22
2	45,71	-0,23	-0,51
3	44,87	0,61	1,36
4	45,45	0,03	0,07
$Q_{med} = 45,48 \text{ l/s}, n = 4, \sum \varepsilon_i^2 = 0,4539$			

- parametrul r_a :

$$r_a = 0,6745\sigma_a, r_a = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_i^2}{n(n-1)}},$$

$$r_a = \pm 0,6745 \sqrt{\frac{0,4359}{4 \cdot 3}} = \pm 0,129$$

- valoarea cea mai probabilă a măsurătorii debitului:

$$Q = 45,48 \pm 0,129 \text{ l/s.}$$

Aplicația 3.

Debitul transportat de un canal este măsurat la un deversor de formă dreptunghiulară la care s-a citit sarcina $h=128$ mm. Sarcina deversorului s-a măsurat cu o eroare de 4 mm. Se cere eroarea relativă de calcul a debitului.

Rezolvare: Prin utilizarea relației erorii relative procentuale (1.17) se obține

$$\delta_h = \frac{\varepsilon_h}{h} \Rightarrow \delta_h = \frac{4}{128} 100 = 3,125\%$$

și

$$\delta_Q = \frac{3}{2} \delta_h \Rightarrow \delta_Q = \frac{3}{2} 3,125 = 4,69\%$$

Aplicația 4.

Determinarea diametrului unei conducte s-a realizat prin metoda volumetrică-gravimetrică. Eroarea de determinare a masei de apă a fost de 50 gr. Masa totală de apă înmagazinată în conductă a fost de 21,6 kg. Lungimea conductei a rezultat din măsurători de 4,0 m, cu o eroare de măsurare de 5 mm. Temperatura apei a fost de 4 °C, pentru care $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

Să se determine eroarea relativă de măsurare a diametrului.

Rezolvare: Relațiile de calcul ale diametrului conductei prin metoda volumetrică sunt următoarele:

$$\text{- volumul de apă din conductă } V = A \cdot l, \text{ sau } V = \frac{m}{\rho}, \text{ unde } A = \frac{\pi D^2}{4};$$

- diametrul rezultă din relația de egalare a celor două volume:

$$D = \sqrt{\frac{4m}{\rho\pi l}}, \text{ sau } D = \sqrt{\frac{4}{\rho\pi}} \cdot \frac{m^{1/2}}{l^{1/2}}.$$

Prin aplicarea relațiilor (1.21...1.24) se obține:

$$\delta_D = \left| \frac{\partial_D}{\partial_M} * \frac{dm}{\sqrt{\frac{4m}{l\rho\pi}}} \right| + \left| \frac{\partial_D}{\partial_L} * \frac{dl}{\sqrt{\frac{4m}{l\rho\pi}}} \right|$$

$$\delta_D = \left| \frac{1}{2} * 50 \frac{1}{m} \right| + \left| \frac{-1}{2} 0,005l \right|$$

$$\delta_D = \frac{1}{2} \frac{50}{21600} * 1 + \frac{1}{2} * 0,005 * 4$$

$$\delta_D = 0,0011 + 0,025 = 0,026157 = 2,6157\%$$

Aplicația 5.

Între un parametru x și funcția y există o corelație lineară conform tabelului. Să se determine ecuația lineară $y = ax + b$ prin metoda celor mai mici pătrate.

Rezolvare: Se aplică relațiile de calcul (1.27) pentru coeficienți a și b .

Tabel 1, Apl. 5. Perechile de valori (x, y)

x	0,5	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
y	2,5	2,7	3,5	3,6	4,6	5,0	5,5	6,0	6,1	6,8	7,8

Tabel 1, Apl. 5. Calculul coeficienților a și b

Nr. crt	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	0,5	2,5	0,25	1,25
2	1,5	2,7	0,25	4,05
3	2,0	3,5	4,00	7,00
4	3,0	5,6	9,00	10,80
5	4,0	4,6	16,00	18,40
6	5,0	5,0	25,00	25,00
7	6,0	5,5	36,00	33,00
8	6,5	6,0	42,25	39,00
9	7,0	6,1	49,00	43,70
10	7,5	6,8	56,25	51,00
11	8,0	6,8	64,00	54,4
Σ	51,0	53,1	304,0	286,6

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{11 \times 286,6 - 51 \times 53,1}{11 \times 304 - 51^2} = 0,59825$$

$$b = \frac{n \sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = \frac{304 \times 53,1 - 51,0 \times 286,6}{11 \times 304 - 51^2} = 2,05357$$

Funcția rezultă sub forma:

$$y = 0,598x + 2,0536.$$

LUCRAREA 1

PROPRIETAȚILE FIZICE ALE LICHIDELOR

În rezolvarea problemelor ingineresti din domeniul hidrotehnic este necesară cunoașterea și măsurarea unor mărimi caracteristice lichidelor. Printre acestea se menționează: densitatea, greutatea specifică, compresibilitatea, viscozitatea, capilaritatea, turbiditatea, tensiunea superficială etc.

1.1. DENSITATEA ȘI GREUTATEA SPECIFICĂ

1.1.1. Considerații teoretice.

Densitatea medie sau masa volumică medie ρ_m reprezintă o mărime fizică scalară care se măsoară prin raportul dintre masa unui element de volum dintr-un corp (Δm) și volumul corespunzător (Δv). Pentru corpurile omogene relația de definiție are forma:

$$\rho_m = \frac{\Delta m}{\Delta v} . \quad (1.1)$$

Densitatea sau masa specifică ρ reprezintă limita către care tinde densitatea medie când elementul de volum corespunzător tinde la zero. Relația valabilă pentru corpuri neomogene este:

$$\rho = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \rho_m = \frac{dm}{dv} . \quad (1.2)$$

Densitatea este o mărime dimensională iar dimensiunea ei rezultă din ecuația de definiție:

$$[\rho] = \frac{[m]}{[v]} = L^{-3}M , \quad (1.3)$$

cu unitatea de măsură în S.I. kg/m^3 .

Măsurarea densității se face cu ajutorul densimetrelor, picnometrelor, balanței Mohr-Westphal, prin metoda hidrostatică, etc.

Greutatea volumică medie (specifică) γ_m reprezintă o mărime scalară care se măsoară prin raportul dintre greutatea unui element de volum

dintr-un corp (ΔG) și volumul corespunzător (Δv); relația valabilă pentru corpurile omogene este:

$$\gamma_m = \frac{\Delta C}{\Delta V} \quad (1.4)$$

Greutatea volumică (specifică) - γ - reprezintă limita către care tinde greutatea specifică medie, când elementul de volum corespunzător tinde la zero. Relația valabilă pentru corpurile neomogene este:

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \gamma_m = \frac{dG}{dV} \quad (1.5)$$

Greutatea volumică este o mărime dimensională iar dimensiunea ei rezultă din ecuația de definiție:

$$[\gamma] = \frac{[\Delta G]}{[\Delta V]} = ML^{-2}T^{-2}, \quad (1.6)$$

cu unitatea de măsură N/m^3 în S.I.

Între densitate și greutatea specifică a unui corp există relația de recurență:

$$\gamma = \rho g, \quad (1.7)$$

unde g este accelerația gravitațională.

Valoarea densității și greutateii specifice variază cu presiunea și temperatura lichidului. Variația masei specifice cu temperatura se poate calcula cu relația:

$$\rho = \rho_0 = [1 - \alpha(t - t_0)], \quad (1.8)$$

în care: ρ_0 este masa specifică la temperatura standard t_0 .

Analog variația greutateii specifice a lichidelor în funcție de temperatură este dată de relația:

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{1 + \alpha(t - t_0)}, \quad (1.9)$$

în care: γ este greutatea specifică la temperatura t ;

γ_0 - greutatea specifică la temperatura t_0 ;

α - coeficientul de distilație volumică.

Greutatea specifică a unui amestec de lichide se determină cu relația:

$$\gamma_{am} = \frac{\gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_n V_n}{V_1 + V_2 + \dots + V_n}, \quad (1.10)$$

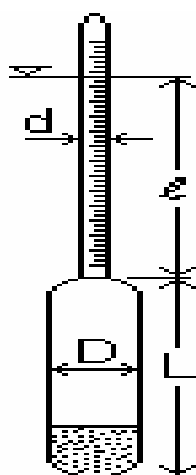
în care: $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ sunt greutateile specifice a componentelor amestecului;

- $V_1, V_2, \dots, V_n$ - volumele specifice a componentelor amestecului.

1.1.2. Scopul lucrării

Scopul lucrării constă în determinarea densității și greutatei specifice a lichidelor prin utilizarea unor aparate diferite ca structură constructivă.

1.1.3. Aparatura experimentală



Areometrul (Fig. 1.1) este construit dintr-un tub de sticlă cu diametre diferite fiind lestat la un capăt cu alicie de plumb pentru ai asigura verticalitatea în imersiune și greutatea necesară. Celalalt capăt prezintă o scară gradată pentru determinarea poziției de imersiune față de nivelul lichidului. Poziția de echilibru se va realiza în momentul egalării greutății proprii cu greutatea volumului de lichid dezlucuit. Se observă că volumul părții care se scufundă este invers proporțional cu densitatea. Densitatea se citește direct pe scara gradată.

Fig. 1.1. Areometrul

Balanța Mohr-Westphal (fig. 1.2) - este folosită pentru determinarea densității lichidelor care au $\rho \neq 1$, fiind de fapt o modificare a balanței hidrostactice. Pe un suport (1) metalic cu înălțime reglabilă și având posibilitate de calare cu ajutorul a două șuruburi (2) și o nivelă (3), se află un braț (4) care la un capăt are prins un cârlig și de acesta un flotor (5). Flotorul este prevăzut cu un termometru iar balanța cu greutăți de 5g; 0,5g; 0,05g; 0,005g pentru echilibrări. Lichidul a cărui densitate trebuie aflată se pune într-un cilindru atașat aparatului (6).

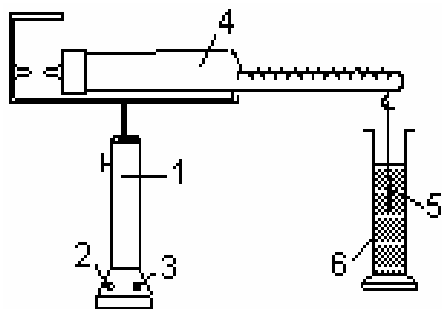


Fig. 1.2. Balanța Mohr-Westphal

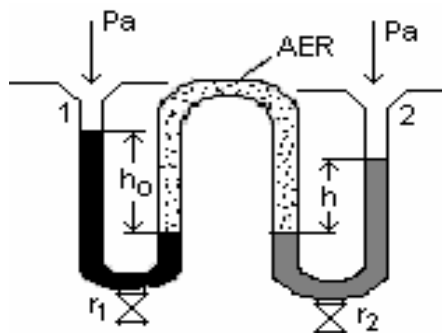


Fig. 1.3. Metoda hidrostatică

Metoda hidrostatică. Pentru măsurarea densității prin această metodă se folosește un tub de sticlă îndoit în trei, robineți (r_1, r_2) ca în figură și un lichid etalon de densitate cunoscută (Fig.1.3). În ramura (1) se pune lichidul de densitate cunoscută iar în ramura (2) lichidul a cărei densitate vrem să o aflăm. Denivelările ce apar se citesc la sistemul de măsurare atașat tubului.

Metoda gravimetrică. Pentru măsurarea densității se cântărește un volum de lichid cunoscut cu ajutorul unei balanțe. Cunoscându-se temperatura lichidului se determină densitatea cu ajutorul relațiilor cunoscute.

1.1.4. Modul de lucru

Areometrul - pentru determinarea densității unui lichid se pune acesta într-un vas care să permită scufundarea areometrului. În prealabil vasul se spală cu apă distilată pentru a nu modifica proprietățile fizice și chimice ale lichidului supus experimentărilor. Pentru început se alege din set un areometru care are pe scară valori mai mari, continuându-se cu areometre cu scara compusa din valori mai mici până se poate efectua o citire corectă la unul din areometre. Conform descrierii areometrului densitatea se citește direct pe scară. Se repetă operația și pentru celelalte lichide supuse determinărilor.

Balanța Mohr-Westphal. Lichidul a căruia densitate dorim să o determinăm se pune în cilindrul de sticlă după care se scufundă flotorul în el. Scufundarea flotorului produce o dezechilibrare a balanței datorită rezultantei presiunilor. Pentru echilibrare se pun greutatea pe brațul balanței în creștături după cum urmează: la densități mai mici de 1, se atâră un calareț de 5g pe creștătura 9. Dacă brațul variază se mută călărețul pe creștătura 8. Operația se repetă până când brațul balanței rămâne denivelat în jos. În mod analog se procedează cu călăreții în ordinea descrescândă a greutății lor până la echilibrarea balanței. Citind numerele aflate sub fiecare călăreț în ordinea mărimii se obține rezultatul determinării.

La greutatea mai mari de 1 se pune un călăreț de 5 g pe cârligul final care corespunde cu creștătura 10, iar următorii se vor plasa în modul expus mai sus. Dacă de exemplu se obține echilibrul cu călărețul al doilea pe creștătura 2 și ceilalți pe creștătura 4 și 8 atunci greutatea specifică va fi 1,248.

Metoda hidrostatică. Presiunea manometrică din planul de contact (N-N) al celor două lichide cu aerul, conform ecuației de bază a hidrostaticii este:

$$P_{N-N} = \rho_o g h_o = \rho g h \quad (1.11)$$

de unde:

$$\rho = \rho_o \frac{h_o}{h} \quad (1.12)$$

Deci se măsoară cele două denivelări h și h_o cu ajutorul relației (1.12) și se calculează densitatea.

Determinările pentru fiecare lichid și temperatura, la fiecare metodă se repetă de cel puțin trei ori pentru eliminarea erorilor și obținerea unor valori corecte.

1.1.5. Prelucrarea și interpretarea datelor

În urma experimentărilor rezultă o serie de valori directe ale densității sau greutateii specifice care se trec în tabelul 1.1. cu valoarea temperaturilor. Valorile medii ale densităților și greutateilor specifice rezultă prin prelucrarea statistică a valorilor.

1.2. VISCOZITATEA

1.2.1. Considerații teoretice

Viscozitatea reprezintă proprietatea fluidelor de a opune rezistență la curgere. Viscozitatea unui lichid se caracterizează prin coeficientul de viscozitate dinamică și cinematică.

Viscozitatea dinamică η - reprezintă o mărime fizică în relația lui Newton, definită ca raportul dintre tensiunea tangențială și gradientul de viteză.

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dn}} \quad (1.13)$$

Viscozitatea cinematică ν - reprezintă raportul dintre viscozitatea dinamică și densitatea fluidului.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.14)$$

Viscozitatea este o mărime dimensională iar dimensiunea ei rezultă din ecuația de definiție:

- viscozitatea dinamică:

$$[\eta] = [\tau] \div \left[\frac{dv}{dn} \right] = FL^{-2}T = ML^{-1}T^{-1} \quad (1.15)$$

- viscozitatea cinematică:

$$[\nu] = [\eta] \div [\rho] = (FL^{-2}T) \div (FL^{-4}T^2) = L^2T^{-1} \quad (1.16)$$

cu unitatea de măsură în m^2/s în S.I..

În tehnică se mai folosește și unitatea de măsură tolerată denumită “Stokes”:

$$1 \text{ cm}^2/s = 1 \text{ St.} \quad (1.17),$$

sau viscozitatea convențională în grade Engler ($^{\circ}E$).

Viscozitatea convențională reprezintă o mărime determinată prin măsurarea timpului de curgere a unui volum de lichid dintr-un aparat în condiții convenționale alese, sau prin orice altă metodă care nu ține seama de legile curgerii.

Trecerea de la grade de viscozitate Engler la coeficientul de viscozitate cinematică se face cu relația empirică:

$$10^6 \nu (m^2/s) = 7,3 \nu^0 E - \frac{6,31}{\nu^0 E}. \quad (1.18)$$

Variația viscozității apei cu temperatura este dată de relația lui Poiseuille:

$$\nu = \nu_0 (1 + 0,0337 t + 0,000222 t^2)^{-1} \quad (1.19)$$

unde: ν_0 este viscozitatea cinematică la temperatura t ; t – temperatura în $^{\circ}C$.

Măsurarea viscozității se face cu ajutorul unor aparate numite viscozimetre care după modul lor de funcționare sunt foarte diverse. Cele mai folosite în tehnică sunt următoarele: viscozimetrul Engler, viscozimetrul cu tub capilar (Ostwald), viscozimetrul cu corp căzător Höppler, viscozimetrul cu cilindri rotitori.

1.2.2. Scopul lucrării

Scopul lucrării este determinarea viscozității unui lichid și cunoașterea folosirii aparatelor frecvent utilizate în practică.

1.2.3 Aparatura experimentală

Viscozimetrul cu tub capilar (fig.1.4) – Ostwald este cel mai simplu aparat de acest fel și servește la determinarea viscozității relative. Pe un suport (1) se află un tub de sticlă în formă de U la care o ramură este formată din capilarul propriu-zis (2) și rezervorul V_1 (3), iar cealaltă ramură dintr-un tub de sticlă mai mare în diametru (4) având la bază rezervorul V_2 (5). Rezervorul V_2

are un volum mai mare decât V_1 . Pe tubul de sticlă (6) se află un reper (7) format dintr-o strângere iar la începutul capilarului se află al doilea reper (8). Racordările între tuburi și rezervoare sunt luate cu scopul de a asigura o curgere cât mai completă a lichidului supus experimentării.

În timpul experimentării aparatul se introduce într-o baie de termostatare care asigură menținerea constantă a temperaturii. Etalonarea viscozimetruului Ostwald se efectuează cu un lichid cu viscozitate cunoscută. Pentru calculul viscozității se folosește relația:

$$\eta = \eta_0 \frac{t\rho}{t_0\rho_0} \quad (1.20)$$

în care: η ; ρ ; t reprezintă viscozitatea și timpul de scurgere al unui volum de lichid determinat; η_0 ; ρ_0 ; t_0 – viscozitatea, densitatea și timpul de scurgere pentru lichidul etalon.

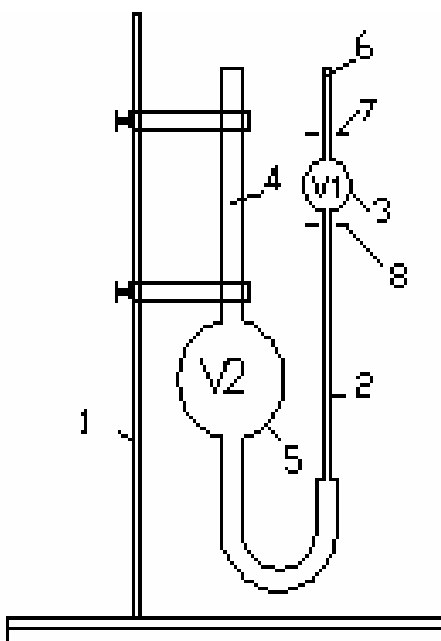


Fig. 1.4. Viscozimetru cu tub capilar – Ostwald

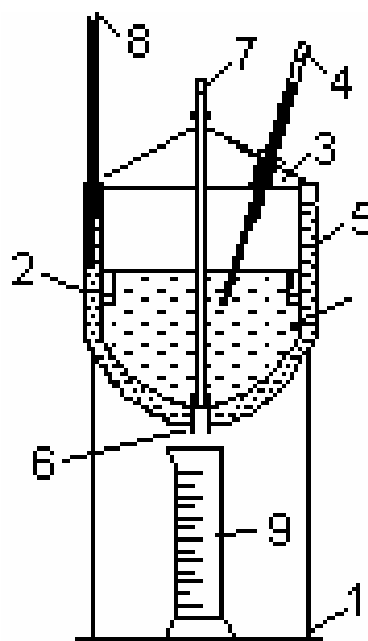


Fig.1.5. Viscozimetru Engler

Viscozimetru Engler este folosit în special pentru determinarea viscozității uleiurilor. Poate determina viscozitatea oricărui lichid care trece de la 1,15°E la temperatura determinării și se scurge în fir continuu la această temperatură.

Viscozimetru Engler (fig. 1.5) se compune dintr-un recipient metalic (1) care constituie baia de încălzire și în care se află un rezervor (2) cu capac (3), un agitator (4) și un termometru (5). Rezervorul 2 cu capac prezintă la

partea inferioară un orificiu (6) obturat de o tijă (7). Tijă străbate rezervorul și capacul cu posibilitatea de manevrare pe la partea superioară. De asemenea, asemenea în rezervor se mai află un termometru (5) și trei repere (8). Colectarea lichidului scurs în timpul determinărilor se face într-un cilindru gradat (9). Apa folosită în baia de încălzire se aduce la temperatura cerută de experiment cu ajutorul unei surse de căldură. Aparatul este montat pe un suport (10) care poate fi calat.

Viscozitatea convențională $\nu^{\circ}E$ a unui lichid se calculează cu relația:

$$\nu^{\circ}E = \frac{t}{t_0} \quad (1.21)$$

în care: t este timpul de scurgere a 200 ml de lichid la temperatura 20°C, în secunde; t_0 – timpul de scurgere a 200 ml de apă distilată la 20°C (constanta aparatului), în secunde.

1.2.4. Modul de lucru

a. Viscosimetrul Ostwald. Pentru determinări se vor folosi lichide cu diverse concentrații de săruri sau de turbiditate la diverse temperaturi. Se umple rezervorul V_2 cu lichidul supus determinării și se aspiră acesta în rezervorul V_1 până trece de reperul (7), astfel ca în rezervorul V_2 să rămână lichid la un nivel bine determinat. Se lasă să curgă lichidul, cronometrând timpul de parcurgere a acestuia între cele doua repere. În prealabil viscosimetrul a fost pus în baia de termostare care asigură o temperatură constantă în timpul determinării. Trebuie avut în vedere ca aparatul, respectiv capilarul să fie perfect vertical.

b. Viscosimetrul Engler. Lichidul supus determinării se pune în rezervor după ce s-a obturat orificiul cu tijă, până ce nivelul depășește puțin vârful celor trei repere. Se ridică tijă astfel ca lichidul să curgă prin orificiu și nivelul din rezervor să ajungă la vârful celor trei repere. În caz contrar se calează aparatul și se repetă operația de umplere. În baie, lichidul de încălzire trebuie să fie cu cel puțin 1 cm deasupra nivelului lichidului din rezervor. Se pune capacul pe rezervor și se introduc termometrele. Temperatura lichidului din baie se reglează prin încălzire sau prin adăugare de lichid rece, omogenizarea făcându-se cu ajutorul agitatorului.

Dacă temperatura rămâne constantă în cele doua vase se poate începe determinarea viscozității prin măsurarea timpului de scurgere a lichidului din rezervor respectiv a 200 ml de lichid. Determinările se repetă de trei ori pentru

aceeași temperatură. Prin câteva valori ale temperaturii se poate construi curba $v = f(v_0, t)$.

1.2.5. Prelucrarea și interpretarea datelor

Valorile obținute prin experimentare pentru o anumite temperaturi se prelucreează statistic în tabelul 1.2. Perechile de valori (v, t) se reprezintă grafic rezultând graficul de variație a viscozității cu temperatura.

1.3. CAPILARITATE

1.3.1. Considerații teoretice

Capilaritatea reprezintă ansamblul de fenomene la contactul dintre un lichid și un solid, dintre două lichide nemiscibile sau dintre un lichid și un gaz, datorită acțiunii forțelor moleculare. Lichidele urcă sau coboară în tuburi de diametre mici, sub influența unei forțe suplimentare, datorită tensiunii superficiale. Coeficientul de tensiune superficială σ - reprezintă o mărime fizică egală cu raportul dintre forța de tensiune superficială și lungimea elementului de linie pe care se produce. Dimensional $[\sigma] = MT^{-2}$ iar unitatea de măsură este N/m (S.I.). Acesta are o valoare determinată; astfel pentru apă-aer la 20°C, $\sigma = 0,0755$ N/m, pentru mercur-aer, $\sigma = 0,54$ N/m.

Într-un tub de diametru “d” ascensiunea capilară “h” se determină cu următoarea relație:

$$h = \frac{4\sigma}{\gamma d}, \quad (1.22)$$

care poate fi transpusă sub forma $h \cdot d = C = \text{constant}$, cu constanta $C = 30$ pentru apă la $t = 20^\circ\text{C}$ și $C = -14$ pentru mercur (h și d fiind exprimați în mm).

Ascensiunea capilară între doi pereți plani verticali paraleli foarte apropiați este:

$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\gamma \cdot d}, \quad (1.23)$$

unde: d este distanța între pereți; α - unghiul de racordare al meniscului.

Ascensiunea capilară la un perete plan vertical se calculează cu relația:

$$h = \sqrt{\frac{2\sigma}{\gamma}}. \quad (1.24)$$

1.3.2. Scopul lucrării

Vizualizarea ascensiunii capilare și determinarea coeficientului de tensiune superficială pentru apă.

1.3.3. Aparatura experimentală

Pentru studiul fenomenului de capilaritate (fig.1.6) se folosește o baterie de tuburi de diametre diferite cuprinse în intervalul 0,5-8 mm (1), alimentate din rezervorul (2). Măsurarea ascensiunii capilare se face cu ajutorul unui panou (3) amplasat în spatele bateriei de tuburi de sticlă. Orizontalitatea aparatului se realizează prin șuruburile de calare (4) și tuburile de control (5).

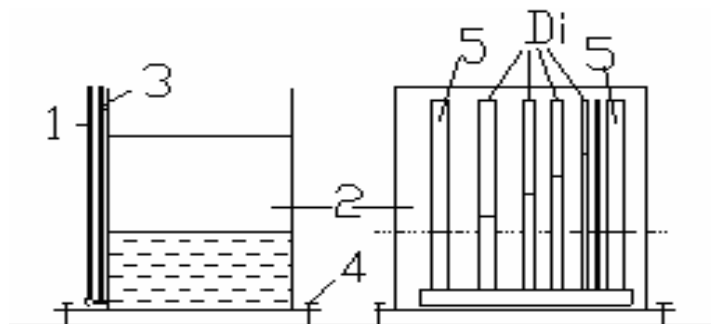


Fig. 1.6. Baterie de tuburi capilare

1.3.4. Modul de lucru

Bateria de tuburi de sticlă pune în evidență ascensiunea capilară funcție de diametrul tubului. Cea mai mare ascensiune va fi în tubul de diametru 0,5 mm cea mai mică în tubul de diametru 8 mm.

În acest scop se verifică gradul de curățenie al bateriei și se umple rezervorul de alimentare cu lichidul respectiv. Se aduce aparatul în poziție orizontală prin șuruburile de calare până ce citirile vor fi identice în cele două tuburi cu diametrul de 8 mm. Se observă ascensiunea în tuburile bateriei și se notează poziția lor. Se mai adaugă o cantitate de lichid în rezervorul de alimentare după care se notează din nou poziția nivelului. Operația sus menționată se repetă de câteva ori.

1.3.5. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor

În urma celor trei măsurători rezultă o serie de valori ale ascensiunii capilare pentru diversele diametre. Cu valorile preluate se calculează coeficientul de tensiune superficială cu relația:

$$\sigma = \frac{\gamma(d_8 - d_i)h_i h_8}{4(h_i - h_8)} \text{ (N/m)}. \quad (1.25)$$

Valorile calculate se trec în tabelul 1.3 și se compară cu cele existente în literatura de specialitate.

1.4. COMPRESIBILITATE

1.4.1. Considerații generale.

Compresibilitatea reprezintă proprietatea fluidelor de a-și schimba volumul sub acțiunea variației de presiune. Evaluarea cantitativă a compresibilității se face cu ajutorul modulului de compresibilitate β - care reprezintă raportul dintre variația relativă a unui volum de fluid și variația de presiune care o produce:

$$\beta = -\frac{\frac{dV}{V}}{\frac{dP}{P}} \text{ sau } \beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dP} \quad (1.25)$$

Inversul modulului de compresibilitate se numește modul de elasticitate (ε)- mărime ce caracterizează gradul de elasticitate al unui fluid.

$$\varepsilon = \frac{1}{\beta} \text{ sau } \varepsilon = \rho \frac{dP}{d\rho}. \quad (1.26)$$

1.4.2. Scopul lucrării.

Scopul lucrării constă în determinarea experimentală a coeficientului de compresibilitate β la ulei.

1.4.3. Aparatura experimentală.

Instalația de etalonat manometre (fig. 1.7) se compune dintr-o conductă (1) în care se află un volum de ulei V care provine din rezervorul de alimentare (2), manometrele pentru măsurarea presiunii (3) și un piston filetat (4), acționat de o roată (5).

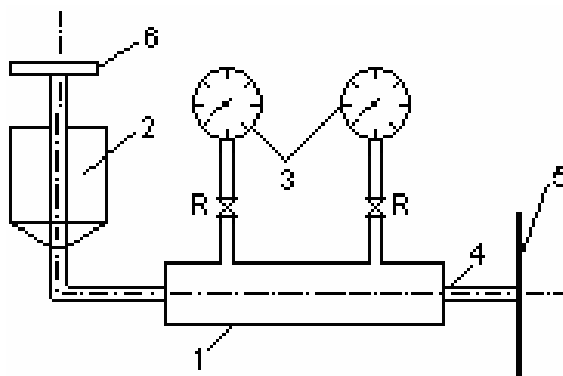


Fig.1.7. Instalația de etalonat manometre

1.4.4. Modul de lucru

Se verifică dacă robinetul pentru manometrul la care se vor face măsurătorile este deschis. Se închide robinetul unuia dintre manometre. Se acționează roata de antrenare a pistonului până la deschiderea maximă și se umple conducta instalației cu ulei având deschis robinetul rezervorului (6).

Când se consideră că s-a terminat umplerea instalației cu ulei se închide rezervorul, și se rotește foarte încet roata până ce se realizează presiunea de 10 bar.

Din acest moment se numără foarte atent rotațiile necesare pentru a ridica presiunea până la 60 de atmosfere. Operația se repetă de cel puțin trei ori.

La terminarea experiențelor se deschide roata și în același timp se deschide robinetul rezervorului de ulei. Robinetul de la manometru se închide când acesta arată valoarea zero.

1.4.5. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Prin prelucrarea valorile măsurate se calculează coeficientul de compresibilitate conform relației (25) unde:

$$\Delta V = n \cdot t \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ (m}^3\text{)} \quad (1.27)$$

unde: n este numărul de rotații a pistonului pentru ridicarea presiunii de la 10 la 60 de bar; t – pasul filetelui (2,0 mm); d– diametrul mediu al pistonului (17 mm).

Valorile obținute se prelucrează statistic și se compară cu valoarea coeficientului de compresibilitate prezente în literatura de specialitate ($\beta = 47,10^{-6} \text{ 1/at}$). Rezultatele calculelor se trec în tabelul 1.4.

Tabele pentru rezultate experimentale:

Tabel 1.1 Densitatea și greutatea specifică a lichidelor

Nr. crt.	Lichidul de măsurat	ρ_i (Kg/m ³)	T_i (°C)	ρ (Kg/m ³)	γ (N/m ³)	Obs.

Tabel 1.2. Viscositatea lichidelor

Nr. crt.	Lichidul de măsurat	T_i (°C)	t_i (s)	v (°E)	v (m ² /s)	μ (kg/sm)	Obs.
	Lichid etalon (apă distilată)						

Tabel 1.3. Fenomenul de capilaritate

Nr. crt.	D_i (mm)	h_i (mm)	σ_i (N/m)	σ (N/m)	Obs.

Tabel 1.4. Coeficient de compresibilitate

Nr. crt.	Δp_i (bar)	n_i (ture)	β_i (bar ⁻¹)	β (bar ⁻¹)	Obs.

LUCRAREA 2

MĂSURAREA PRESIUNILOR

2.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Presiunea medie în interiorul unui fluid se definește ca fiind forța care acționează pe unitatea de suprafață. Mărimea acesteia depinde de poziția punctului față de sistemul de referință considerat și este independentă de poziția suprafeței.

Presiunea poate fi:

- absolută (barometrică) – p_t – presiunea măsurată de la zero absolut

$$p_t = p_a + \gamma h; \quad (2.1)$$

- relativă (manometrică sau vacumetrică) – p – presiune măsurată în plus sau în minus față de o presiune de referință:

$$p = p_t - p_a = \gamma. \quad (2.2)$$

Presiunea fiind o mărime fizică poate fi pusă în evidență prin măsurători directe cu ajutorul aparatelor de măsurat.

2.1.1. Aparare utilizate la măsurarea presiunilor. Clasificare

Aparatele folosite la măsurarea presiunilor se clasifică după diferite criterii:

a. după mărimea presiunii de măsurat:

- manometre și micromanometre;
- vacumetre și microvacumetre;
- manovacumetre;
- barometre.

b. după destinație:

- aparate etalon;
- aparate model;
- aparate de lucru.

c. după principiul de funcționare:

- aparate cu lichid;
- aparate cu element elastic
- aparate cu piston;
- aparate electrice;
- aparate combinate;
- aparate înregistratoare.

2.1.2. Aparate cu lichid

a. Piezometrul (fig. 2.1) este un tub de sticlă ce se atașează sistemului în punctul în care urmează să fie determinată presiunea.

Presiunea manometrică este egală cu greutatea coloanei de lichid exercitată pe unitatea de suprafață:

$$p = p_t - p_a = \gamma h. \quad (2.3)$$



Fig.2.1. Piezometrul

b. Manometrul cu tub U, (fig.2.2) este format dintr-un tub de sticlă în formă de U umplut cu lichid manometric. În cazul măsurării unei presiuni mai mari decât cea atmosferică lichidul manometric coboară în brațul A, și urcă în B.

Presiunea totală este:

$$p_t = p_a + \gamma h, \quad (2.4)$$

iar presiunea manometrică:

$$p = p_t - p_a = \gamma h. \quad (2.5)$$

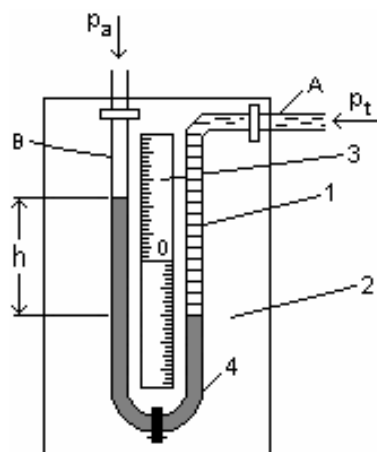


Fig.2.2. Manometrul cu tub U

Când se măsoară o presiune mai mică decât cea atmosferică lichidul manometric în brațe se denivelează invers primului caz, adică lichidul manometric coboară în brațul B și urcă în A:

$$p_t = p_a - \gamma h \quad (2.6)$$

$$p = p_t - p_a = -\gamma h \quad (2.7)$$

Presiunea astfel determinată poate fi eronată datorită neluării în considerare a temperaturii mediului ambiant. Corecția de citire a coloanei de lichid se face ținând seamă de dilatarea riglei și a lichidului manometric. Scările sunt gradate pentru temperatura normală de 20°C iar densitatea lichidului manometric este cunoscută la temperatura “ t ” cu citirea h_t . Corecția este:

$$h_o = h_t \frac{1 + \alpha(t - 20)}{1 + \beta(t - t_o)} \quad (2.8)$$

în care: h_o - este coloana de lichid pentru temperatura t_o ;

h_t - coloana de lichid pentru temperatura t ;

α - coeficientul de dilatare liniară a scării gradate;

β - coeficientul de dilatare volumică a lichidului manometric.

c. Manometrul diferențial, este folosit pentru măsurarea diferențelor de presiune și are aceeași formă constructivă ca și manometrul cu tub U. Ambele brațe ale manometrului sunt legate în punctele între care se măsoară diferențe de presiune. Manometrele diferențiale pot fi directe sau indirecte (fig. 2.3.).

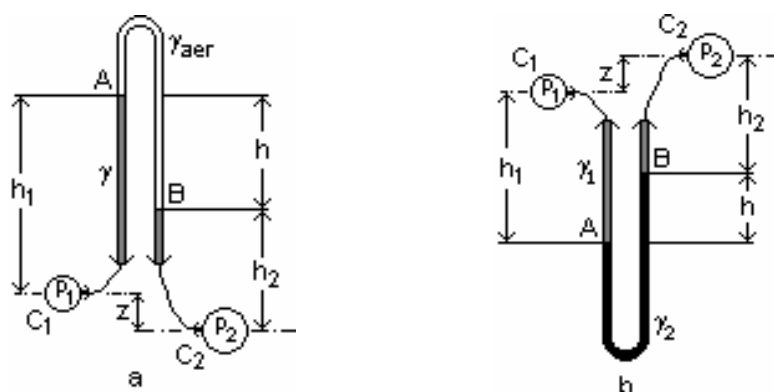


Fig. 2.3. Manometru diferențial: a – direct; b – indirect.

Ecuatiile hidrostaticii pentru cele două cazuri sunt:

a.

$$\begin{aligned} P_A &= P_1 - \gamma h_1 \\ P_B &= P_A + \gamma_{aer} h \\ P_2 &= P_B + \gamma h_2 \end{aligned} \quad (2.9)$$

b.

$$\begin{aligned} P_A &= P_1 + \gamma_1 h_1 \\ P_B &= P_A - \gamma_2 h \\ P_2 &= P_B - \gamma_1 h_2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Adunând ecuațiile membru cu membru se obține:

$$P_1 - P_2 = \Delta p = (h - z)\gamma \quad P_1 - P_2 = \Delta p = (\gamma_2 - \gamma_1)h - \gamma_1 z \quad (2.11)$$

d. Micromanometrul cu lichid. Acest aparat face parte din categoria aparatelor cu lichid cu rezervor și tub, tubul însă are poziție înclinată.

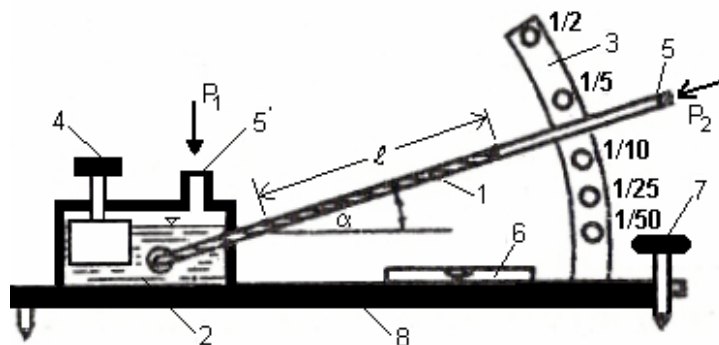


Fig. 2.4. Micromanometrul cu lichid și tub înclinat

Diferența de presiune este:

$$P_1 - P_2 = \gamma l \cdot \sin \alpha \quad (2.12)$$

Aparatul este compus din tub de sticlă înclinat, gradat (1), rezervor cu lichid manometric (2), sector de cerc gradat (3), piston cu șurub (4), prize de racordare (5, 5'), nivelă (6), șuruburi de calare (7), suport (8).

2.1.3. Aparare cu element elastic

Deoarece aparatele pentru măsurarea presiunilor, cu lichid sunt foarte pretențioase, în practica curentă se folosesc aparate metalice: manometre, vacumetre, manovacumetre, care prezintă o serie de avantaje. Clasa lor de precizie variază între 0,2% și 6%.

a. Aparat cu tub simplu curbat (tub Bourdon) Este cel mai des întâlnit și poate fi folosit ca manometru, vacumetru și monovacumetru.

În secțiune transversală tubul elastic are formă eliptică, simetrică față de cele două axe de simetrie. Axa mică se află în planul de îndoire a tubului curbat.

Elementul elastic cu secțiunea transversală, eliptică poate avea și formă de spirală sau elicoid permițând obținerea unor performanțe superioare în privința preciziei.

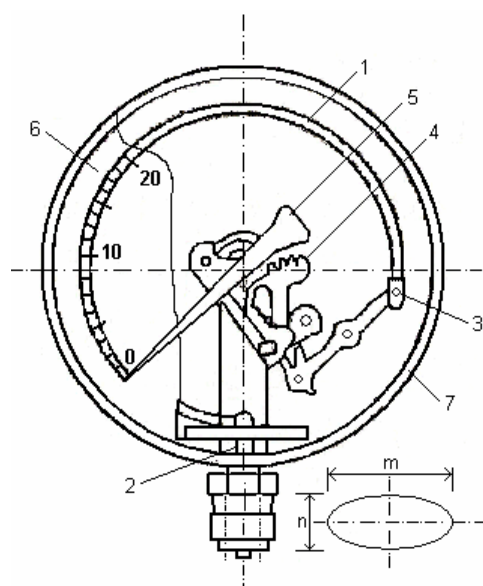


Fig. 2.5. Manometru cu tub curbat: 1. tub Bourdon; 2. suport; 3. capăt liber al tubului Bourdon; 4. sector dințat; 5. ac indicator; 6. cadran; 7. carcasă

b. Aparat cu membrană. Acesta poate măsura presiuni manometrice sau vacumetrice și are ca element sensibil o membrană elastică. Membrana este ondulată în cercuri concentrice. Diametrul exterior al membranei este prins fix iar de la centru se atașează sistemul de transmisie și amplificare. Pot fi folosite cu succes pe instalații unde apar trepidații sau vibrații (fig. 2.6).

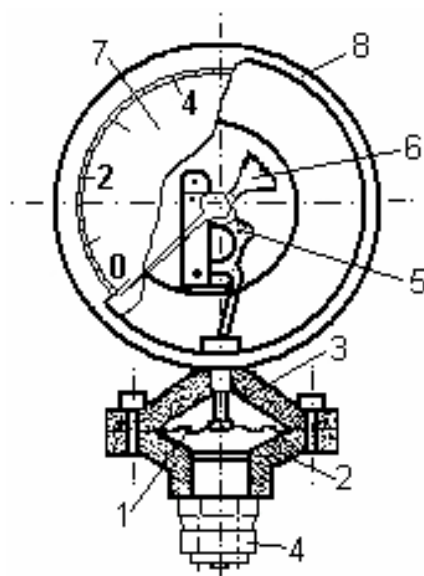


Fig. 2.6. Manometru cu membrană simplă: 1. membrană elastică; 2. flanșă inferioară; 3. flanșă superioară; 4. niplu de legătură; 5. sector dințat; 6. ac indicator fixat pe roata dințată; 7. cadru gradat; 8. carcasă

c. Aparat cu burduf. Elementul elastic la astfel de aparate este un burduf în formă de cutie cilindrică, cu ondulații uniforme. Schema cinematică a aparatelor cu burduf este redată în fig. 2.7.

La manometre și vacumetre la presiunea atmosferică acul indicator trebuie să se sprijine pe știft iar la manovacumetre trebuie să fie în dreptul indicației zero. Precizia aparatelor și unitatea de măsură este înscrisă în procente pe cadranul gradat.

Presiunea maximă de lucru a manometrelor cu element elastic nu depășește $2/3$ din presiunea nominală în regim constant și $1/2$ din presiunea nominală la regim variabil.

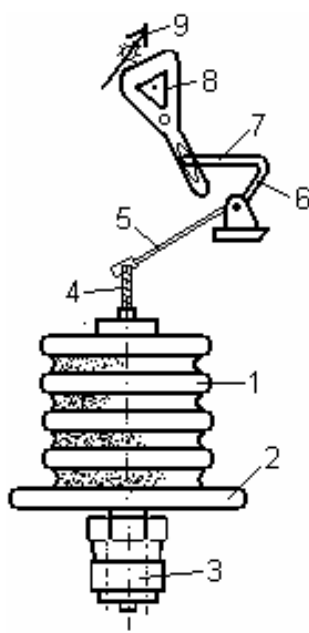


Fig.2.7. Manometrul cu burduf: 1-burduf; 2-suport; 3- niplu de legătură; 4. tijă de legătură; 5,6,7. pârgii de transmitere; sector dințat; 9. ac indicator fixat pe roata dințată.

2.1.4. Manometre etalon cu piston și greutate

Aparatele etalon cu piston și greutate (fig. 2.8) sunt folosite la determinări metrologice, precizia de măsurare fiind cuprinsă între 0,01 și 0,05%.

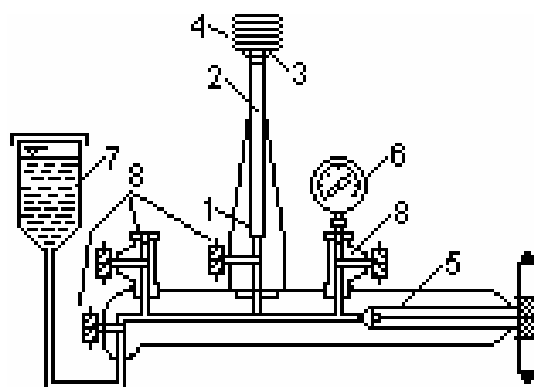


Fig. 2.8. Manometru etalon cu piston și greutate

1 - coloană cu cilindru; 2 - piston; 3 -talerul pistonului; 4 - greutăți etalonate;
5 – pompă de presiune; 6 – manometru de etalonat; 7 – rezervor de ulei; 8 – robineți.

Presiunile maxime care pot fi obținute nu depășesc 50 kgf/cm^2 , peste aceste valori apărând eforturi orizontale în piston ce conduc la erori. Eliminarea erorilor se face prin rotirea pistonului cu taler și greutate. Presiunea din sistem este:

$$p = \frac{G_1 + G_2}{S} \quad (2.13)$$

Pentru erori maxime $\delta = \pm 0,01 \%$ aparatele sunt de etalon, pentru $\delta = \pm 0,02 \%$ - aparatele model de ordinul I, și pentru $\delta = \pm 0,05\%$ - aparate model de ordinul II.

Pentru obținerea unor presiuni etalon sau model se folosesc manometre etalon cu piston diferențial și greutate.

2.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării îl constituie cunoașterea aparatelor de măsurat presiunea, modul de lucru cu aparatele, măsurarea unor presiuni manometrice și vacumetrice, etalonarea unui manometru cu element elastic (tub Bourdon).

2.3. INSTALAȚIILE EXPERIMENTALE

La experimentări se va folosi instalația din figura anterioară, un manometru etalon cu piston și greutate și manometre cu element elastic.

Instalația experimentală cuprinde:

- un rezervor de alimentare RA, alimentat de la rețeaua laboratorului prin robinetul R_1 , prevăzut cu tub piezometric;
- un cilindru C_1 care se alimentează cu apă de la rezervorul RA, prin intermediul robinetului R_2 . Tubul C_1 este în legătură cu tubul C_2 prin intermediul conductei de legătură pe care este amplasat robinetul de izolare R_3 și robinetul de evacuare R_4 . Pe cilindrul C_2 este montat robinetul de evacuare a aerului R_5 , un monovacumetru cu element elastic MV, prizele de presiune P_4 , P_5 și P_6 ;
- priza de presiune P_6 echipată cu robinetul de izolare R_6 ;
- instalația este prevăzută cu aparate pentru măsurarea presiunilor și diferențelor de presiune, cu lichid:
 - manometru cu tub U cu apă M_1 ;
 - manometru cu tub cu mercur M_2 , M_5 ;
 - tuburile piezometrice T_1 și T_2 ;
 - manometru diferențial direct M_4 ;
 - manometru diferențial indirect M_3 ;
 - micromanometru cu tub înclinat.

Ștuțurile prizelor de presiune sunt legate prin furtune de transmiterea presiunilor la aparatele de măsurat conform fig. 2.9.

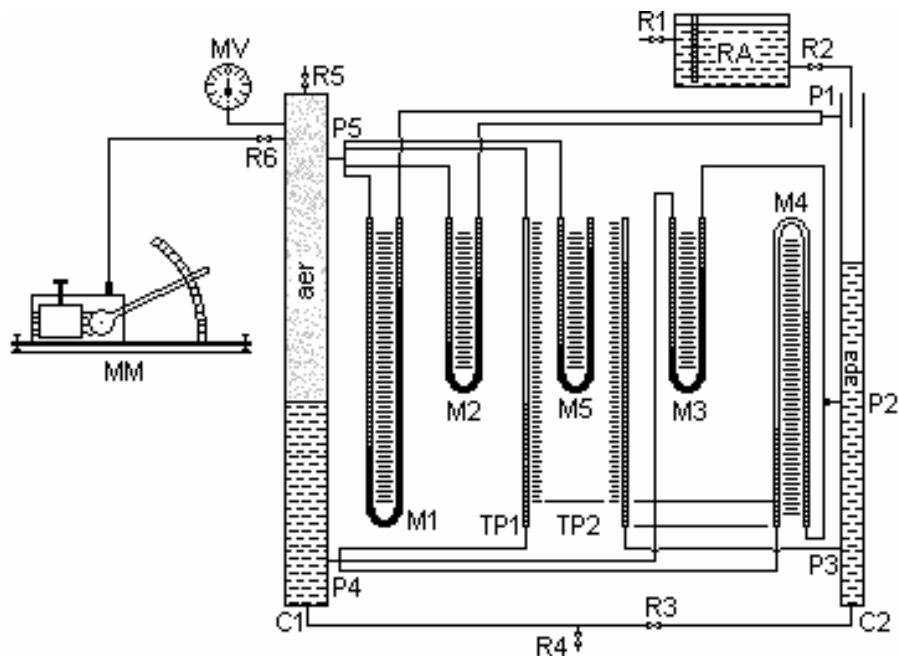


Fig.2.9. Schema instalației experimentale pentru măsurarea presiunilor

2.4. MODUL DE LUCRU

Modul de lucru pentru măsurarea unor presiuni manometrice și vacuometrice cuprinde următorii pași:

- se demontează și se studiază un manometru cu tub Bourdon și un manometru cu burduf;
- se controlează cu robinetele R_1 ; R_2 ; R_4 ; R_5 ; R_6 să fie închise iar R_3 deschis;
- se umple rezervorul RA cu apă deschizând robinetul R_1 ;
- după umplere se închide robinetul R_1 și se deschide R_2 pentru alimentarea cilindrului C_1 având robinetele R_3 , R_5 și R_6 închise. După o denivelare de circa 2 cm în tuburile piezometrice se închide robinetul R_2 ;
- se fac citirile la toate aparatele și se notează înălțimea coloanei de lichid denivelate, în tab. 2.1. Citirea la micromanometrul MM se efectuează după calarea și aducerea la zero a aparatului, racordarea furtunului de transmitere a presiunilor priza P_6 cu ștuțul "a" și deschiderea robinetului R_6 .
- după citire se închide robinetul R_6 și se debransează furtunul de la ștuțul "a";

- se deschide robinetul R_2 și se lasă să se umple cilindrul C_1 până ce pe tubul piezometric T_2 se citește valoarea maximă;
- în această poziție se fac citirile la toate aparatele de măsurat și valorile se notează în tabel;
- se închide robinetul R_3 și se deschide R_5 ;
- se închide robinetul R_5 după egalarea coloanelor manometrelor M_1 , M_2 , M_5 și apoi se deschide încet robinetul R_4 și se evacuează apa din cilindrul C_1 până ce pe tubul piezometric T_1 citirea scade cu circa 2 cm, după care se închide R_4 . Prin această manevră se creează o presiune vacumatică în cilindrul C_1 ;
- se brânșează priza P_6 la ștuțul “b” a micromanometrului MM și după deschiderea robinetului R_6 se fac citirile la toate aparatele de măsurat, inclusiv la micromanometru;
- se închide R_6 , se debrânșează priza P_6 de ștuțul “b” a micromanometrului și se deschide robinetul R_4 până ce nu mai curge apa, apoi se închide;
- se fac iarăși citirile la toate aparatele, și se notează valorile în tabelul 2.1.

- se deschid robinetele R_3 , R_4 , R_5 până ce pe tuburile piezometrice T_1 , T_2 indicația depășește semnul roșu, după care se închid robinetele R_4 și R_5 ;
- se studiază manometrul cu piston și greutate;
- se montează un manometru cu element elastic pe un ștuț;
- se deschid robinetele și se retrace pompa umplând circuitul cu ulei;
- se așează o greutate pentru o atmosferă pe platanul pistonului și cu pompa se creează presiune până ce pistonul se ridică, apoi acesta se învârtă manual;
- se notează presiunea citită pe manometrul cu element elastic în tabelul 2.
- operațiile se repetă pentru presiuni din atm. în atm. până la 6 atm;
- se calculează corecțiile și se mișcă brațul manometrului cu element elastic în fanta de culisare a sectorului dințat spre ax, dacă corecțiile au fost negative și în sens opus dacă corecțiile au fost pozitive;
- se repetă operațiile până ce manometrul cu element elastic indică corect.

2.5. PRELUCAREA REZULATELOR EXPERIMENTALE

Se notează observațiile privind manometrele cu element elastic.

Citirile pe aparate (instalația din fig. 2.9) se trec în tabelul 2.1 și se calculează presiunile în N/m^2 .

Tabel 2.1

Nr crt	Tuburi piezometrice				M1		M2		M5		M3		M4		MM	
	h_{T1} mm	h_{T2} mm	Δh mm	Δp N/m^2	h_1 mm	p_1 N/m^2	h_2 mm	p_2 N/m^2	h_5 mm	p_5 N/m^2	h_3 mm	p_3 N/m^2	h_4 mm	p_4 N/m^2	l	P N/m^2

Indicațiile manometrului cu element elastic se trec în tabelul 2.2.

Tabel 2.2

Nr. crt.	Presiune etalon (kgf/cm^2)	Corecția 1		Corecția 2		Corecția 3		Obs.
		Indic. atm.	Dif. atm.	Indic. atm.	Dif. atm.	Indic. atm.	Dif. atm.	

LUCRAREA 3

FORȚA HIDROSTATICĂ PE O SUPRAFEȚĂ PLANĂ

3.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Pe un perete plan în contact cu apa, se exercită o forță a cărei intensitate este egală cu produsul, dintre presiunea din centrul de greutate al suprafeței și mărimea suprafeței. Forța hidrostatică este un efect al stării de tensiune, exprimată prin eforturile unitare $\vec{p}$. Pe o suprafață infinitezimală dA ce aparține unui perete plan (fig.3.1) se exercită o forță elementară $d\vec{P}$, exprimată astfel:

$$d\vec{P} = \vec{P}_n dA = -p d\vec{A}, \quad (3.1)$$

în care: $\vec{p}_n$ este efortul unitar; p – presiunea.

Pe suprafața peretelui plan forța hidrostatică $\vec{P}$ se obține însumând vectorial forțele elementare $d\vec{P}$:

$$\vec{P} = \iint_A \vec{p} dA = \iint_A -p d\vec{A}. \quad (3.2)$$

Mărimea forței hidrostatice pe întreaga suprafață se calculează cu suma scalară a forțelor elementare dP . Dacă se atașează suprafeței de studiu un sistem de axe ortogonal XOY și se notează cu “h” adâncimea sub planul de apă a suprafeței elementare dA , rezultă:

$$P = \iint_A dP = \iint_A p \cdot dA = \iint_A \gamma h \cdot dA. \quad (3.3)$$

Formula de calcul obținută prin integrare va fi:

$$P = \gamma h_G A. \quad (3.4)$$

unde: γ este greutatea specifică a lichidului; h_G - adâncimea centrului de greutate a suprafeței udate; A - suprafața udată.

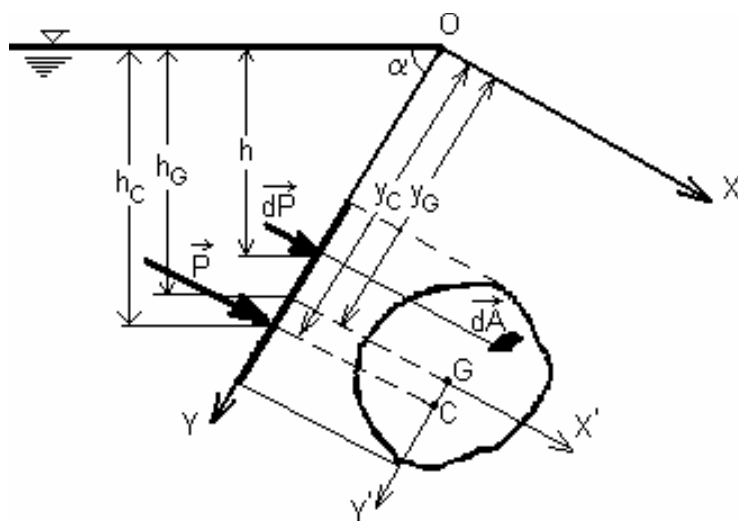


Figura 3.1. Schema de calcul pentru forța hidrostatică exercitată pe un perete plan.

Poziția forței hidrostatice este dată de coordonatele punctului ei de aplicație, numit impropriu centru de presiune și notat cu “C”:

$$x_c = X_G + \frac{I_{x'y'}}{Y_G \cdot A}; \quad y_c = Y_G + \frac{I_{x'}}{Y_G \cdot A}, \quad (3.5)$$

în care: X_G, Y_G sunt coordonatele centrului de greutate; $I_{x'}$ - momentul de inerție al secțiunii udate în raport cu un sistem de axe atașat centrului de greutate și al cărei axe sunt paralele cu OXY; $I_{x'y'}$ - momentul centrifugal al secțiunii udate în raport cu sistemul de axe GX'Y'.

3.2. SCOPUL LUCRĂRII

În cadrul lucrării se va determina teoretic și experimental pentru diverse înălțimi ale apei H , mărimea forței hidrostatice P exercitată asupra unui clapet de închidere. Valorile obținute pe cale experimentală vor fi comparate cu cele calculate teoretic.

3.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală este structurată din următoarele părți (fig. 3.2):

- un rezervor de apă cu pereți de sticlă (1) alimentat de la rețeaua laboratorului prin intermediul robinetului R_1 și golită prin robinetul R_2 ;
- o conductă (2) de acces în cuvă, care la interior este închisă cu un clapet (3) plan montat înclinat cu unghiul α . Închiderea este etanșă pentru a

evita pierderea apei din rezervor. Golirea conductei se face cu ajutorul robinetului R_3 ;

- clapetul este deschis prin intermediul unui scripete (4) cu greutate (5) și cablu (6), fiind articulat în punctul B;
- măsurarea nivelului apei în cuvă se face la o miră atașată acesteia (7);
- greutățile utilizate în experimentare se tarează cu ajutorul unui cântar.

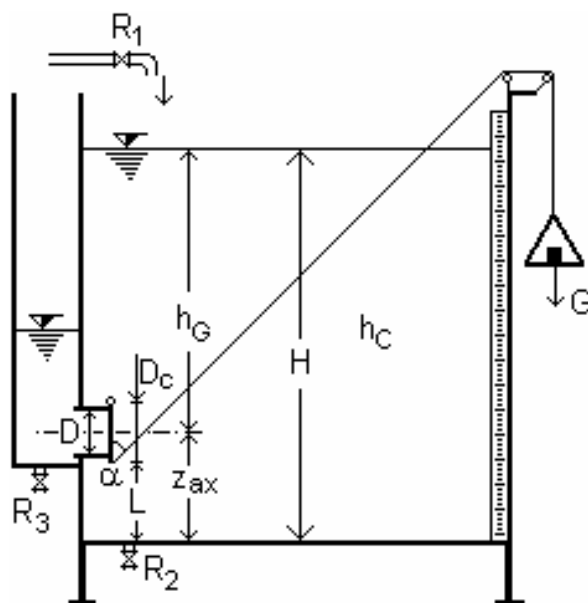


Fig. 3.2. Instalația experimentală pentru măsurarea forței hidrostatice

3.4. MODUL DE LUCRU

Procesul experimental cuprinde următoarele etape:

- la cuva golită de apă se măsoară elementele geometrice ale clapetului, conductei, unghiurile pe care le face cablul scripetelui cu orizontala și verticala, unghiul clapetului cu orizontala;
- se determină momentul de frecare în lagăr, respectiv forța de frecare prin punerea de greutăți succesiv crescătoare pe talerul scripetelui până ce clapetul se deschide; valoarea acestor greutăți, inclusiv greutatea platanului, se notează cu G_1 și reprezintă forța de frecare în articulație;
- se închide robinetul R_2 și se deschide robinetul R_1 pentru alimentarea cuvei până ce nivelul apei H depășește partea superioară a clapetului, după care se deschide robinetul R_3 ;
- se pun greutăți pe platan în mod crescător până ce se obține deschiderea clapetului; se notează greutatea G_2 amplasată pe platan și se

verifică prin cântărire. Apa din conductă se evacuează prin deschiderea robinetului R_3 ;

- la aceeași înălțime H se repetă experimentul de trei ori pentru a reduce influența erorilor;

- se modifică înălțimea de apă H în cuvă și se repetă procesul experimental expus anterior;

- la terminarea experiențelor se golește cuva de apă.

3.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Asupra clapetului acționează următoarele forțe:

- greutatea proprie, G ;
- forța hidrostatică, P ;
- forța de tensiune în cablu, T ;
- forța de frecare în articulație, F_f .

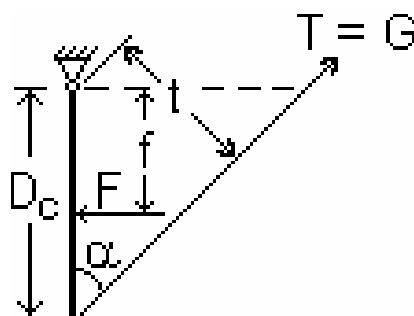


Figura 3.3. Schema cinematică a clapetului

Determinarea forței hidrostatice se poate face prin ecuații de proiecții pe un sistem de axe ales sau printr-o ecuație de momente față de articulația A. Condiția ca sistemul să fie în echilibru este următoarea:

$$\sum Fx_i = 0; \sum Fy_i = 0; \sum M_i = 0. \quad (3.6)$$

Din ecuația de momente față de centrul de rotație rezultă forța hidrostatică:

$$\vec{M}_T + \vec{M}_P + \vec{M}_G + \vec{M}_F = 0,$$

sau

$$T \cdot t - P \cdot p - G \cdot g - F_f \cdot \frac{d}{2} = 0, \quad (3.6)$$

de unde:

$$P = \frac{T \cdot t - G \cdot g - F_f \frac{d}{2}}{p}, \quad (3.8)$$

în care: p , t , g , $d/2$ sunt brațele forțelor.

Calculul teoretic al forței hidrostatice se va face cu relația:

$$P_t = \gamma \cdot h_G A = \gamma \left(h_1 + \frac{D}{2 \sin \alpha} \right) \frac{\pi D^2}{4 \sin \alpha}. \quad (3.9)$$

Valorile experimentale și teoretice precum și cele calculate se trec într-un tabel. Compararea rezultatelor experimentale și teoretice precum și calculul erorii relative se va face tabelar.

Eroarea relativă se va calcula cu relația:

$$\delta_p \% = 100 \frac{P_t - P_{exp}}{P_t}. \quad (3.10)$$

Tabel 3.1. Valori experimentale

Nr. crt.	H (m)	h (m)	h_G (m)	T (N)		P_{exp} (N)	Elemente geometrice
				T_i	T_{med}		
1							
2							
3							

Tabel 3.2

Nr.crt.	H , (m)	P_t , (N)	P_{exp} , (N)	δp , (%)
1				
2				
3				

LUCRAREA 4

ECHILIBRUL RELATIV DE ROTAȚIE

4.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

La mișcarea de rotație în jurul unui ax vertical, vasul ce conține lichid antrenează în mișcare de rotație mai întâi particulele lichide în contact cu pereții, apoi prin forțele de frecare internă, sunt puse în mișcare de rotație – de la periferie spre centru – toate particulele ce formează masa lichidă (Fig. 4.1). Suprafața lichidului, care în stare de repaus era orizontală, se modifică odată cu mișcarea, astfel ca atunci când sistemul ajunge la viteză de rotație constantă ω , suprafața lichidului ia forma unei curbe stabile. O particulă lichidă este supusă în acest caz forței gravitației și forței centrifuge.

Ecuția presiunilor se obține din ecuația generală a echilibrului:

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz), \quad (4.1)$$

în care: $X = x\omega^2$ reprezintă componenta forței centrifuge pe axa OX;

$Y = y\omega^2$ - componenta forței centrifuge pe axa OY;

$Z = -g$ - componenta forței masice gravitaționale.

Relațiile sunt valabile pentru unitatea de masă.

În figura 4.2. s-au reprezentat forțele spațiale care acționează asupra particulei. În orice punct, suprafața lichidului este perpendiculară pe rezultanta celor trei forțe.

După integrare rezultă:

$$\int \frac{dp}{\rho} = \frac{\omega^2 x^2}{2} + \frac{\omega^2 y^2}{2} - gz + C = \frac{r^2 \omega^2}{2} - gz + C, \quad (4.2)$$

iar pentru suprafețele echipotențiale se obține relația:

$$\frac{r^2 \omega^2}{2} - gz + C = 0, \quad (4.3)$$

care reprezintă paraboloizi de rotație.

Ecuția suprafeței libere a lichidului se determină prin constanta C în condiții inițiale ($z = z_0$; $r = 0$; $C = gz_0$):

$$\frac{r^2 \omega^2}{2} - g(z - z_0) = 0. \quad (4.4)$$

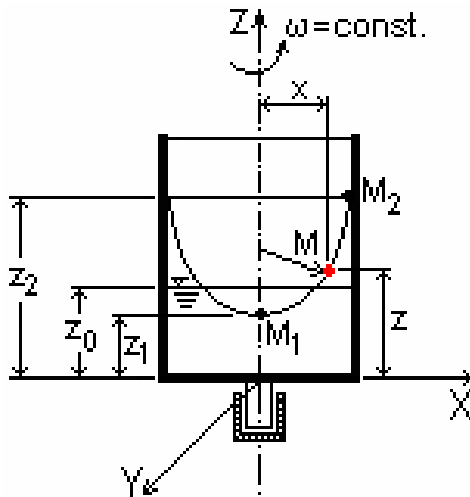


Fig. 4.1. Schema paraboloidului de rotație.

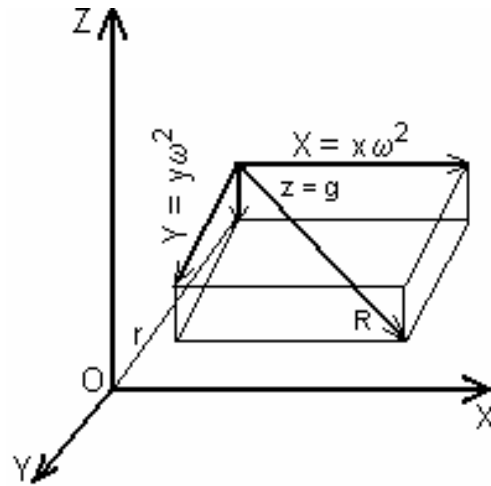


Fig. 4.2. Forțele care acționează asupra unei particule.

Notațiile din fig. 4.1 au semnificația: R este raza cercului superior al paraboloidului (raza cilindrului); r – raza cercului descris de către particula M în mișcare de rotație în plan orizontal; z_0 – cota luciului apei în cilindru când sistemul se află în repaos; z_1 – cota planului cercului inferior al paraboloidului (vârful paraboloidului) față de baza cilindrului; z_2 – cota planului cercului superior al paraboloidului (baza paraboloidului) față de baza cilindrului.

Se obține:

$$\frac{R^2 \omega^2}{2} - g(z_1 - z_0) = 0, \quad (4.5)$$

de unde rezultă viteza unghiulară de rotație a cilindrului:

$$\omega = \frac{1}{R} \sqrt{2g(z_1 - z_0)}, \text{ (radiani / secundă)}. \quad (4.6)$$

Turația cilindrului se obține cu relația:

$$n = \frac{\omega}{2\pi} \text{ (rot./sec.)}. \quad (4.7)$$

Legătura dintre cotele finale z_1 și z_0 și nivelul inițial z_1 se obține știind ca volumul inițial de lichid ocupa în timpul rotației un volum cilindric din care se scade volumul unui paraboloid:

$$\pi R^2 z_o = \pi R^2 z_2 - \frac{1}{2} \pi R^2 (z_2 - z_1), \quad (4.8)$$

sau

$$2z_o = z_1 + z_2. \quad (4.9)$$

4.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în determinarea turației prin calcul, după măsurarea cotelor caracteristice a suprafeței libere a unui lichid în rotație și trasarea parabolei obținute prin intersecția suprafeței libere cu un plan meridian.

4.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală este alcătuită dintr-un cilindru din sticlă care se pune în mișcare de rotație cu ajutorul unei turbine poziționată sub cilindru și legată solidar cu acesta. Turbina este acționată de un jet de apă de la rețeaua laboratorului. Turația se poate regla modificând debitul jetului de acționare a turbinei, prin modificarea deschiderii robinetului de alimentare. Verificarea se face cu un contor de impulsuri și un cronometru. Măsurarea cotelor caracteristice și a razei cilindrului se face cu o rigla fixată paralel cu axul de rotație.

4.4. MODUL DE LUCRU

În desfășurarea experimentului se parcurg următoarele etape:

- se măsoară raza R a cilindrului;
- se toarnă apă în cilindru cel mult $2/3$ din înălțimea sa;
- se măsoară cota z_o cu instalația de măsură atașată cilindrului;
- se pornește turbina și se așteaptă până când suprafața lichidului ia forma unui paraboloid de rotație cu parametri constanți;
- pentru 5 turații diferite se determină cota z_1 cu acul de măsurare;
- se măsoară turația n_o a cilindrului cu ajutorul contorului de rotații și al cronometrului.

4.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Pentru prelucrarea și interpretarea datelor experimentale se parcurg următoarele etape:

- măsurarea cotelor z_0 , z_1 și a turației efective n_0 ; se verifică relația (4.9);
- calculul vitezei unghiulare a vasului aflat în mișcarea de rotație;
- calculul turației vasului aflat în mișcarea de rotație;
- trasarea parabolei de intersecție a suprafeței libere cu un plan meridian.

Datele prelucrate pentru cel puțin trei determinări se trec în tabelul 4.1.

Tabel 4.1. Rezultatele lucrării

Nr. crt.	R (m)	z_1 (m)	z_0 (m)	n (rot)	t (sec)	Turația (rot/sec)	
						Calc.	Măs.
1							
2							
3							

LUCRAREA 5

PLUTIREA CORPURILOR

5.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Asupra unui corp solid cu greutatea G scufundat parțial într-un lichid se exercită o forță ascensională P_A . Condiția de plutire se exprimă sub forma:

$$\vec{P}_A = \vec{G} \quad (5.1)$$

unde

$$P_A = \gamma V_1 \quad \text{și} \quad G = \gamma_1 V,$$

în care V este volumul total al corpului; V_1 - volumul scufundat al plutitorului; γ_1 - greutatea specifică a corpului solid; γ - greutatea specifică a lichidului.

La un corp plutitor se deosebesc următoarele elemente (fig. 5.1):

- planul de plutire;
- aria de plutire;
- linia de plutire;
- carena (volumul scufundat în lichid);
- centrul de carenă (baricentrul carenei);
- baricentrul ariei de plutire;
- pescaj (adâncimea de scufundare în lichid).

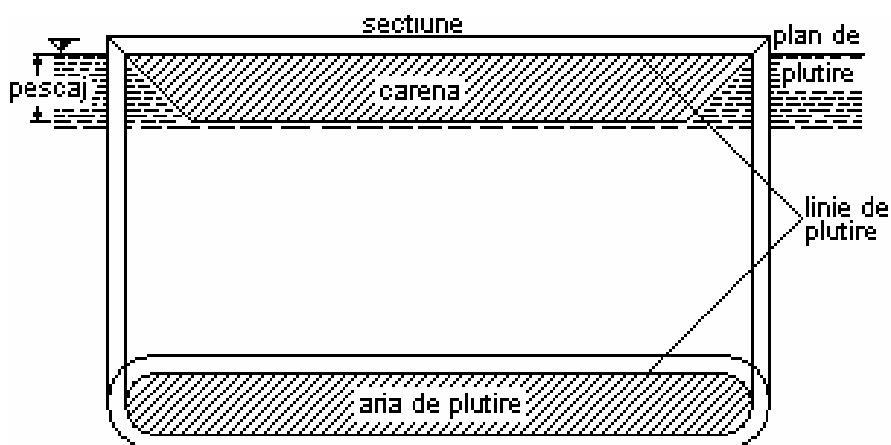


Fig. 5.1. Schema unui plutitor

În poziția verticală, centrul de greutate al plutitorului cade în G , iar centrul de carenă în C (fig. 5.2). Dacă plutitorul se înclină cu unghiul α , planul de plutire se schimbă, modificându-se poziția centrului de carenă. Împingerea apei fiind constantă, trebuie ca volumul HBH' să fie egal cu KBK' . Dreapta de intersecție a planurilor de plutire trece prin centrul de greutate al suprafeței de plutire I (baricentrul suprafeței de plutire).

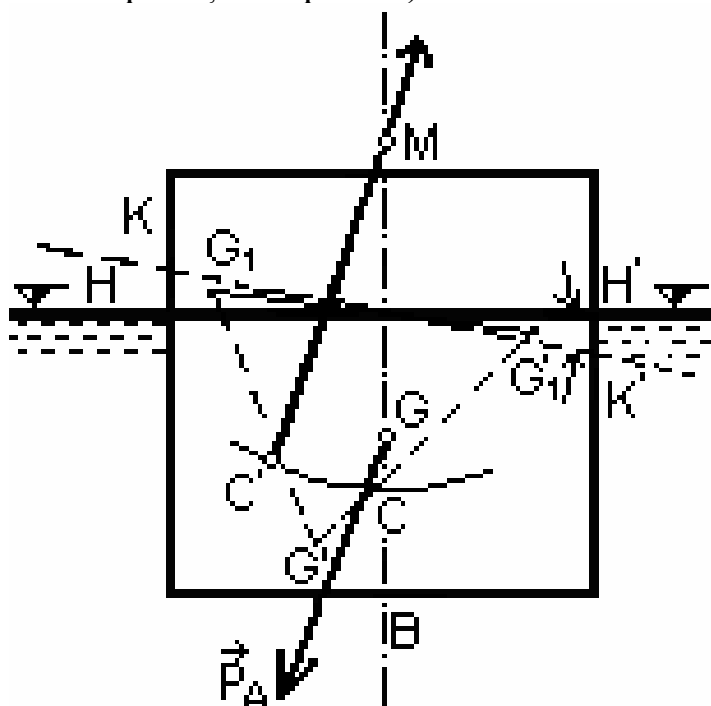


Fig. 5.2. Condițiile de stabilitate a plutitorului

În noua poziție a plutitorului, carena își schimbă forma, iar centrul subpresiunilor va fi în C' , situat pe curba centrelor de carenă. Planul tangent în C' la curba centrelor de carenă este paralel cu linia de plutire KK' .

Centrul de curbă al curbei de carenă se numește **metacentru** (M). Rezultanta subpresiunii P_A este tangentă la o curbă care are un punct de întoarcere în metacentru. Când unghiul α este mic, rezultanta P_A trece foarte aproape de metacentru, acesta jucând rolul unui centru de suspendare a plutitorului. Distanța $\delta = MG$ (fig. 5.3) se numește **distanță metacentrică**.

Cuplul $-P_A$, P_A tinde a îndrepta plutitorul, deci este un cuplu de îndreptare. Stabilitatea plutitorului este cu atât mai mare cu cât metacentrul este mai sus (cuplul de îndreptare crește). Echilibrul este stabil dacă G este sub M .

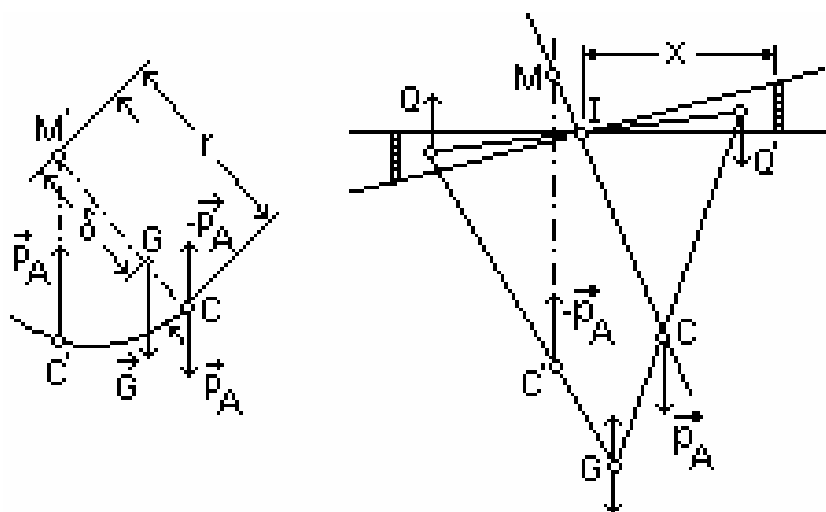


Fig. 5.3. Schema forcelor și momentelor aplicate plutitorului

Distanța metacentrului $GM = \delta$ se calculează cu relația:

$$\delta = \frac{I}{V} \pm a, \quad (5.2)$$

în care: δ este distanța metacentrică;

I – momentul de inerție al ariei de plutire față de axa I_y ;

V – volumul de carenă;

a – segmentul CG.

Condiția de stabilitate a plutitorilor este exprimată de relația:

$$\frac{I_{\min}}{V} - \delta > 0, \quad (5.3)$$

unde $I_{\min}$ este momentul de inerție minimă al ariei de plutire față de diferite axe posibile.

5.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în determinarea pe cale experimentală a distanței metacentrice la un plutitor. Valoarea experimentală a distanței metacentrice va fi comparată cu cea obținută prin calcul pentru parametri dimensionali și cei funcționali ai plutitorului.

5.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ ȘI MODUL DE LUCRU

Plutitorul este realizat sub forma unui corp paralelipipedic cu dimensiunile 50 x 30 x 20 cm, executat din tablă de oțel în grosime de 4 mm (reper 1, fig. 5.4). Pe plutitor este montat un instrument de măsură a unghiului de înclinație realizat dintr-un fir cu plumb (4) montat în fața unui raportor (3).

Greutățile se montează pe plutitor ca în fig. 5.4, pentru ca linia de plutire să treacă prin centrul de greutate al greutateilor și la înclinarea plutitorului (conform fig. 5.3.b); în acest fel se evită apariția erorilor date de modificarea mării brațului forței Q .

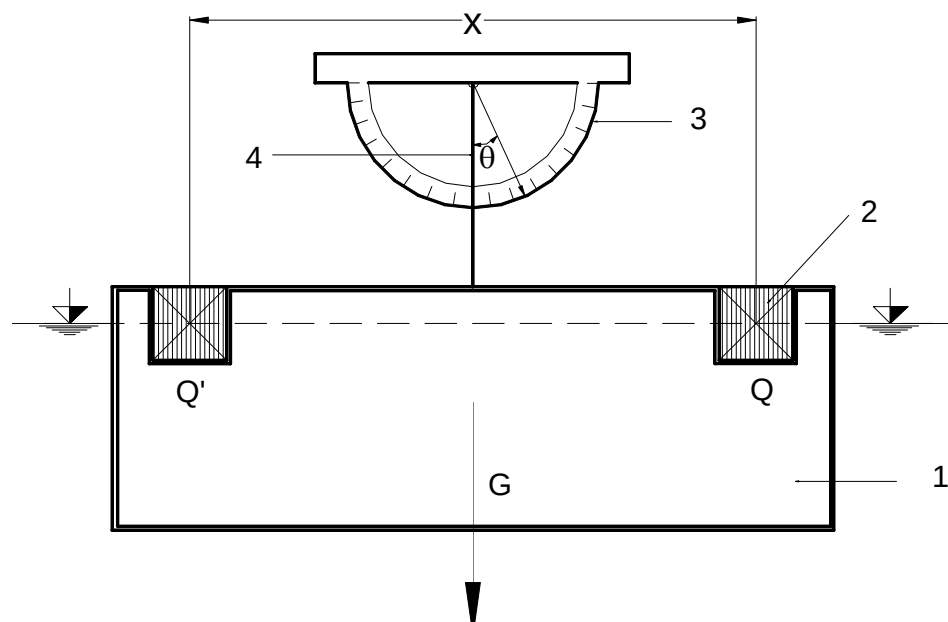


Fig. 5.4. Plutitorul experimental

Procesul experimental cuprinde următoarele etape.

- Se determină greutatea G a plutitorului prin cântărire.
- Se determină valoarea greutateilor Q folosind balanță.
- Într-un vas cu apă se pune plutitorul de greutate G (fig. 5.4).
- Se pune o greutate Q pe plutitor într-un orificiu pe axa transversală la o distanță x impusă de axul longitudinal. După stabilizarea plutitorului în noua poziție de echilibru se măsoară unghiul θ de înclinație a plutitorului la instrumentul de măsură.
- Se mută simetric față de axa longitudinală greutatea Q , situație în care înclinația va fi inversă față de verticală. Se măsoară unghiul θ de înclinație a plutitorului.
- Se repetă de cel puțin 3 ori experimentul pentru aceeași distanță x .

- Se mută greutatea Q în altă poziție pe axa transversală a plutitorului și se repetă operațiile experimentale descrise mai sus.
- Se vor realiza experimentări pentru cel puțin 3-5 distanțe x marcate pe axele plutitorului.

La experimentări se va folosi pentru măsurarea greutăților G , Q o balanță cu precizia de 1 gram. Dimensiunile plutitorului se măsoară cu un instrument de măsură cu precizia de 0,1 mm.

Datele experimentale colectate și calculate sunt transcrise într-un tabel.

5.4. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Distanța metacentrică pentru diversele valori ale unghiului θ măsurate experimental se calculează cu relația:

$$\delta = GM = \frac{Q \cdot x}{G \cdot \operatorname{tg} \theta} \quad (5.4)$$

și se trec în tabel.

Cele trei valori pentru fiecare distanță x se prelucrează statistic.

Cu relația (5.2) se determină pe cale teoretică distanța metacentrică și se trece în tabel. Datele calculate se prelucrează statistic.

Valorile obținute pe cale teoretică și experimentală se compară între ele.

Rezultatele se trec în tabelul 5.1.

Tabel 5.1. Rezultate experimentale și teoretice

Nr. crt.	G (kg)	Q (kg)	x (cm)	θ	δ_t (m)	$\delta_{ex} = \frac{Q \cdot x}{G \cdot \operatorname{tg} \theta}$
1						
2						
3						

LUCRAREA 6

VIZUALIZAREA ȘI VERIFICAREA ECUAȚIEI BERNOULLI LA UN SISTEM HIDRAULIC DE CONDUCTE SUB PRESIUNE

6.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Una din cele mai importante relații din hidraulică, dată de integrarea primei ecuații din sistemul Euler în câmpul de forțe gravitațional, este ecuația lui Bernoulli. Aceasta din punct de vedere dimensional este o sumă de lungimi. Din punct de vedere energetic, ecuația Bernoulli este o sumă de energii specifice, adică o sumă de energii raportate la unitatea de greutate a fluidului considerat.

Pentru un curent de lichid unidimensional aflat într-o mișcare permanentă sau nepermanentă, ecuația Bernoulli are forma de exprimare:

- pentru o linie de curent la un lichid perfect (fără pierderi de sarcină) între două puncte 1 și 2:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (6.1)$$

- pentru un lichid real în mișcare permanentă cu neglijarea pierderilor de sarcină hidraulică:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} \quad (6.2)$$

- pentru un curent de lichid real în mișcare permanentă cu considerarea pierderilor de sarcină hidraulică:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h r_{1-2}; \quad (6.3)$$

- pentru un curent de lichid real în mișcarea nepermanentă:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{1}{g} \int_{s_1}^{s_2} \beta \frac{\partial v}{\partial t} ds + h r_{1-2}; \quad (6.4)$$

- pentru mișcări relative (sisteme mobile):

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{W_1^2 - U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{W_2^2 - U_2^2}{2g}. \quad (6.5)$$

În ecuațiile de mai sus, termenii au următoarele semnificații din punct de vedere geometric:

- $z_{1,2}$ - cota punctului față de planul de referință;
- p/γ - înălțime piezometrică;
- $H_p = z + \frac{p}{\gamma}$ - cotă piezometrică;
- u – viteză punctuală; v – viteză medie;
- $\frac{\alpha v^2}{2g}$ - înălțime cinetică (termen cinetic);
- $h_{r_{1-2}}$ - pierderea de sarcină între punctele 1 și 2 ale curentului de lichid;
- α - coeficientul lui Coriolis;
- $\frac{1}{g} \int_{s_1}^{s_2} \beta \frac{\partial v}{\partial t} ds$ - înălțimea inerțială;
- β - coeficient de distribuție neuniformă a vitezelor în mișcarea nepermanentă;
- W – viteza relativă a particulei față de un sistem de axe legat solidar cu sistemul; U – viteza tangențială.

Din reprezentarea grafică a ecuației lui Bernoulli pentru un curent de lichid real aflat într-o mișcare permanentă se pun în evidență următoarele linii caracteristice (fig. 6.1):

- linia de referință sau planul de referință (PR) al sistemului hidraulic (1);
- linia piezometrică (2) situată la distanța $H_p = z + \frac{p}{\gamma}$ față de planul de referință;

- linia energetică (3) situată la distanța $H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ față de planul

de referință, sau la distanța $\frac{\alpha v^2}{2g}$ față de linia piezometrică; linia

energetică la un curent ideal de lichid coincide cu planul de sarcină;

- plan de sarcină (4).

Prin interpretare energetică a ecuației lui Bernoulli rezultă pentru fiecare termen semnificația:

- z – energia specifică de poziție (energie potențială);
- $\frac{p}{\gamma}$ - energie specifică de presiune (energie potențială);
- $z + \frac{p}{\gamma}$ - suma energiilor specifice potențiale;
- $\frac{\alpha v^2}{2g}$ - energie specifică cinetică;
- h_r – sau $\gamma h_r = \Delta E$, pierdere de energie hidraulică, respectiv energie hidraulică transformată în altă formă de energie;
- $H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha v^2}{2g}$ - energia specifică a curentului într-o secțiune (sumă de energii potențiale și cinetice).

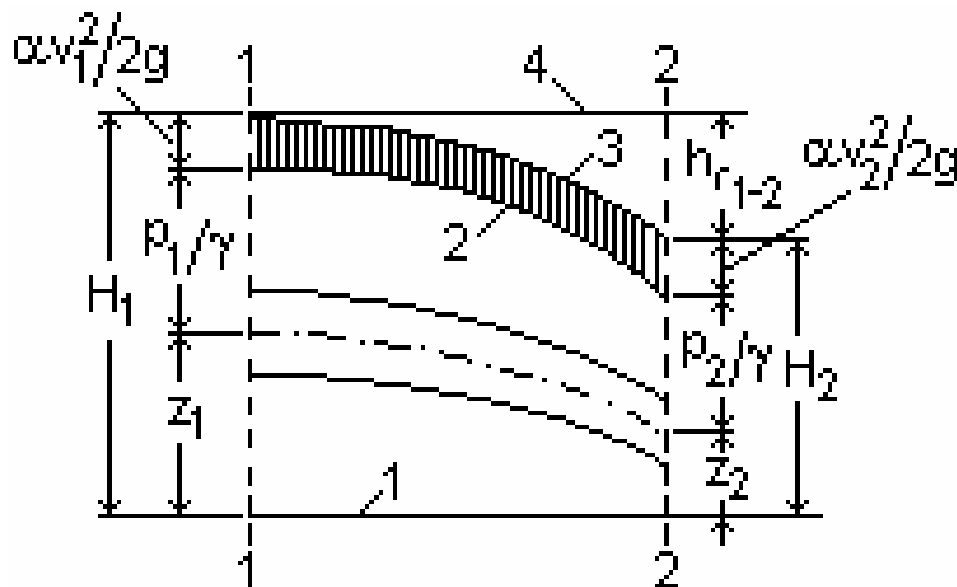


Fig. 6.1. Reprezentarea ecuației lui Bernoulli

Linia piezometrică delimitează domeniul de existență a energiei potențiale de domeniul de existență a energiei cinetice.

6.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este de a vizualiza și aplica legii lui Bernoulli la un sistem hidraulic de conducte sub presiune. De asemenea, se vor compara termenii ecuației mășurați la un tablou piezometric atașat sistemului hidraulic cu cei calculați pentru instalația respectivă.

6.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pentru vizualizarea legii lui Bernoulli se va folosi o instalație experimentală ce descrie un sistem hidraulic de conducte sub presiune (fig. 6.2). Instalația experimentală este structurată pe următoarele părți componente:

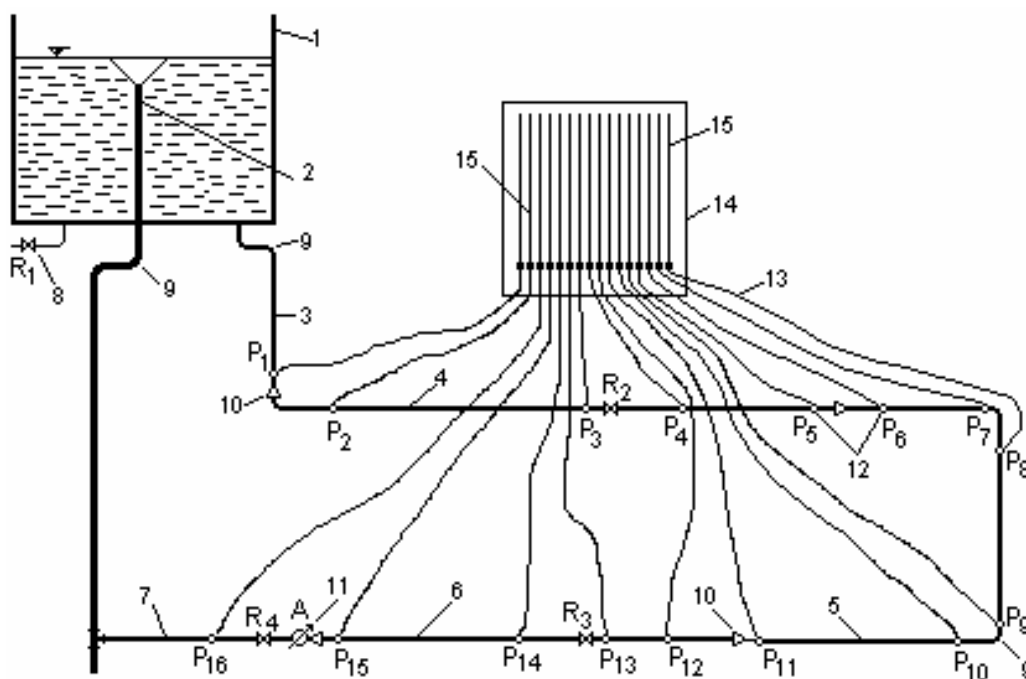


Fig. 6.2. Instalația experimentală

- rezervor de alimentare (1) cu preaplin (2);
- 5 conducte legate în serie, cu diametrele: $D_1=25,4\text{ mm}$ (3), $D_2=38\text{ mm}$ (4); $D_3=25,4\text{ mm}$ (5), $D_4=38\text{ mm}$ (6) și $D_5=19,5\text{ mm}$ (7);
- armături montate pe conductă: robinete (8), coturi (9), reducții (10);
- contor de volum (apometru) (11);

- prize de presiune (12) la care sunt montate câte un furtun de transmitere a presiunii (13) la un tablou (14) cu tuburi piezometrice (15);
- instalația este alimentată de la rețeaua laboratorului;
- instalația de evacuare a apei din rezervor.

6.4. MODUL DE LUCRU

- Se fixează planul de referință a instalației și se determină cotele $z_{1...16}$ a prizelor de presiune.

- La începutul experimentărilor se verifică dacă robinetul R_4 este închis.

- Pentru alimentarea instalației experimentale cu apă și umplerea rezervorului se deschide robinetul R_1 .

- În momentul în care pe preaplin începe să curgă apa, aspect funcțional care trebuie verificat în timpul experimentărilor pentru a se realiza o sarcină constantă pe alimentare, se deschide robinetul R_4 , iar robinetele R_2 și R_3 rămân în poziții intermediar deschise.

- Se manevrează robinetele R_2 și R_3 (spre închis), astfel încât să se obțină o denivelare de circa 10...15 cm la tuburile piezometrice amonte și aval de robinete.

- La tuburile piezometrice se citesc înălțimile de apă H . La fiecare experiment se măsoară volumetric debitul, prin notarea indicațiilor contorului (nr. ture inițial și nr. ture final) pentru un interval de timp "t".

- se modifică deschidea robinetelor R_2 , R_3 și R_4 , și se repetă operațiile prezentate anterior. Experimentele se repetă de cel puțin 3...5 ori. Valorile experimentale se trec în tabelele de calcul.

6.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Valorile experimentale care sunt preluate de pe stand se trec în tabele de calcul și se prelucrează. Debitul și viteza apei în instalația experimentală sunt calculate în tabelul 6.1. Relațiile de calcul sunt următoarele:

- : volumul de apă citit la contor:

$$V = V_f - V_i \quad (\text{m}^3), \quad (6.6)$$

unde V_i este citirea inițială la contor; V_f – citirea finală la contor; V – volumul de apă;

- debitul instalației experimentale se determină prin metoda volumetrică:

$$Q = \frac{V}{t} \text{ (m}^3\text{/s)}, \quad (6.7)$$

unde t este timpul în care contorul a parcurs intervalului $N_i - N_f$;

- viteza apei se determină cu relația:

$$v_{1,2} = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}, \text{ (m/s)} \quad (6.7)$$

unde v_1 este viteza pe conducta cu diametrul $D = 24,5 \text{ mm}$; v_2 - viteza pe conducta cu diametrul $D = 38 \text{ mm}$.

Tabel 6.1. Calculul debitului și vitezei

Nr. exp.	V_i (m ³)	V_f (m ³)	V (m ³)	t (sec)	Q (m ³ /s)	v_1 (m/s)	$\frac{\alpha v_1^2}{2g}$ (m)	v_2 (m/s)	$\frac{\alpha v_2^2}{2g}$ (m)
1									
2									
3									
4									
5									

Înălțimile de apă citite la tabloul piezometric, corespunzătoare fiecărei prize de presiune, $H_{1...16}$ se trec în tabelul de calcul 6.2.

Tabel 6.2. Cote de presiune și piezometrice măsurate

Nr. exp.	Priza 1			Priza 2			Priza 3			Priza 4
	z_1 (m)	H_1 (m)	C_{p1} (m)	z_2 (m)	H_2 (m)	C_{p2} (m)	z_3 (m)	H_3 (m)	C_{p1} (m)	
1										
2										
3										

Verificarea cotelor piezometrice față de planul de referință ales pentru două prize de presiune alăturate și cu neglijarea pierderilor de sarcină se face cu relația:

$$\left(z + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}\right)_{am} = \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g}\right)_{av}, \quad (6.9)$$

în care indicele am = amonte, respectiv prima priză de presiune considerată, iar av = aval corespunde celei de a doua prize de presiune. Prizele de presiune se vor alege situate în amonte și aval de îmbinarea două tuburi cu diametre diferite. Din relația (6.9) se va determina înălțimea de presiune $\left(\frac{p}{\gamma}\right)$ și cota piezometrică $C_p = z + \frac{p}{\gamma}$ în amonte sau aval. Valorile calculate și cele măsurate se trec în tabelul 6.3.

Tabel 6.3. Verificarea cotei de presiune și cotei piezometrice

Nr. exp.	Priza amonte				Priza aval			
	z (m)	H (m)	$\frac{\alpha v_{am}^2}{2g}$ (m)	C_p (m)	z (m)	H (m)	$\frac{\alpha v_{av}^2}{2g}$ (m)	C_p (m)
1								
2								
3								

Pe un format A4 se întocmește profilul longitudinal a instalației hidraulice desfășurată pe care se reprezintă la o scară distorsionată parametri relației Bernoulli și liniile caracteristice.

LUCRAREA 7

MĂSURAREA PRESIUNII DE IMPACT, VITEZEI ȘI DEBITULUI CU TUBUL PITOT – PRANDTL

7.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Tubul Pitot – Prandtl este un instrument pentru măsurarea presiunii de impact statice, dinamice și totale. În mod indirect, tubul Pitot-Prandtl măsoară viteza medie-locală și debitul la curenți de fluid. Măsurarea vitezelor și a debitelor se bazează pe determinarea presiunii de stagnare.

Tubul Pitot – Prandtl este structurat din următoarele elemente componente (Fig. 7.1):

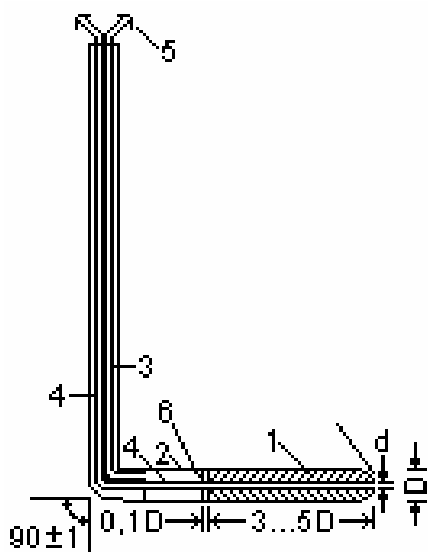


Fig. 7.1. Tubul Pitot – Prandtl: 1 - partea frontală cu priza de captare; 2 - corp principal; 3 – tub pentru presiunea statică; 4 – tub pentru presiunea totală; 5 - prize de presiune; 6 – orificiu pentru captarea presiunii statice; 7 - orificii de captare a presiunii totale

Partea frontală a tubului se execută sub o formă sferică, cu o toleranță de 0,02 mm. Tubul trebuie să fie etanș și îngrijit executat. Nu se recomandă utilizarea sa la fluide viscoase sau cu particule în suspensie.

Secțiunea în care se fac măsurătorile trebuie să fie rectilinie, fără surse de perturbații (variații de secțiune, coturi, organe de închidere etc.) pe o lungime de cel puțin $10 D$ în amonte și $5 D$ în aval (unde D este diametrul tubului).

Axul tubului trebuie să fie paralel cu direcția de curgere, astfel ca abaterile să nu fie mai mari de 5° . Distanța minimă între axul longitudinal al tubului și peretele conductei trebuie să fie de 5 ori mai mare decât diametrul tubului. Fixarea corectă a tubului în secțiunea de măsură se realizează prin ghidaje și dispozitivul de culisare.

Măsurătorile se realizează prin amplasarea tubului Pitot-Prandtl conform fig. 7.2:

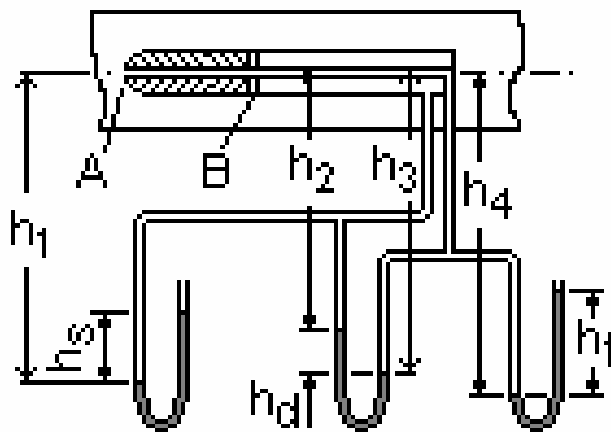


Fig.7.2. Montarea manometrelor la tubul Pitot-Prandtl

La măsurarea presiunii dinamice este suficientă montarea unui manometru diferențial.

Relațiile de calcul la măsurarea presiunii sunt următoarele:

a. Măsurarea presiunilor locale:

$$p_{st} = \gamma_0 h_{st} - \gamma h_1, \quad (7.1.a)$$

$$p_d = \gamma_0 h_d - \gamma(h_3 - h_2), \quad (7.1.b)$$

$$p_t = \gamma_0 h_t - \gamma h_4, \quad (7.1.c)$$

unde p_s este presiunea statică; p_d – presiunea dinamică; p_t - presiunea totală.

b. Măsurarea vitezei medii locale:

$$v = k_1 \sqrt{2g\varepsilon H_d}, \quad (7.2)$$

în care v este viteza medie locală (m/s); k_1 - constanta de etalonare a tubului Pitot – Prandtl ($k_1 \approx 1$); g - accelerația gravitațională (m/s^2); H_d - presiunea dinamică (mca); ε - coeficient de compresibilitate (pentru lichide $\varepsilon = 1$).

c. *Măsurarea vitezei medii și debitului*: determinarea vitezei medii se poate face prin medierea vitezelor locale sau prin etalonarea aparatului în axul conductei, conform relației:

$$v = k\sqrt{2g\varepsilon H_d}, \quad (7.3)$$

unde k este constanta de etalonare a aparatului și are o valoare subunitară.

Debitul se obține din ecuația de continuitate, cunoscând viteza și secțiunea conductei.

7.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în cunoașterea modului de lucru cu tubul Pitot – Prandtl și tararea acestuia pentru măsurarea vitezelor medii și debitului la o conductă sub presiune.

7.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală este formată dintr-o conductă alimentată de la rețeaua laboratorului (Fig. 7.3). Conducta este prevăzută cu două robinete, în amonte (R_1) și în aval (R_2), pentru reglarea debitelor și a presiunilor.

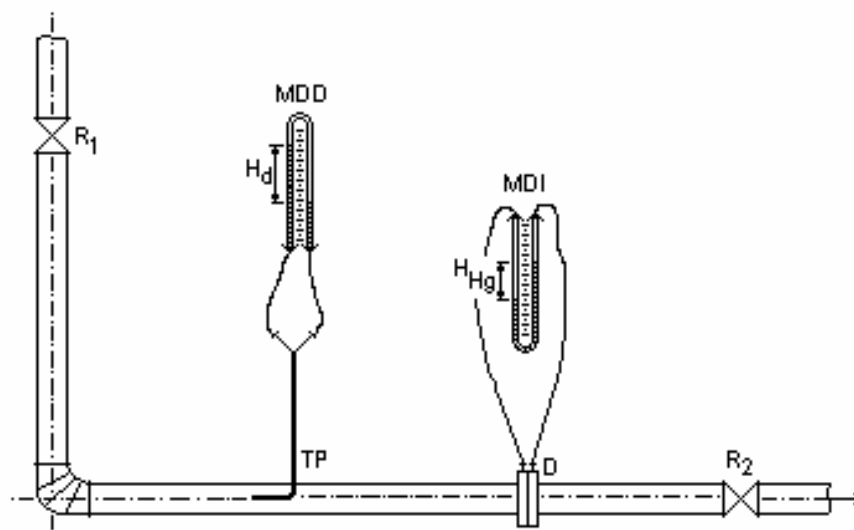


Fig. 7.3. Instalația experimentală

Pe conductă este realizat un dispozitiv în care se montează tubul Pitot – Prandtl (TP). Pentru măsurarea debitului se montează în secțiunea aval a conductei o diafragmă (D) la care se atașează un manometru diferențial indirect. Caracteristica hidraulică a diafragmei este cunoscută și are expresia:

$$Q = c\sqrt{H}, \quad (7.4)$$

în care Q este debitul tranzitat prin conductă (l/s); c – constanta diafragmei; H – diferența de presiune la manometrul diafragmei (MDI), (mca).

Aerisirea instalației experimentale se realizează prin robinetul R_3 .

Verificarea debitului tranzitat prin conductă se realizează prin metoda volumetrică prin utilizarea unui rezervor etalonat.

7.4. MODUL DE LUCRU

Procesul experimental cuprinde următoarele etape.

1. Se verifică caracteristicile constructive ale unui tub Pitot – Prandtl nemontat.

2. Tubul Pitot – Prandtl se supune unui proces de etalonare, care are ca scop determinarea constantei k . Pentru aceasta se măsoară debitul cu ajutorul diafragmei sau rezervorului etalonat, iar la manometru diafragmei se măsoară presiunea dinamică. Etapele de lucru sunt următoarele:

- se alimentează instalația experimentală prin deschiderea robinetelor R_1 (total) și R_3 (parțial) și tot odată se aerisește instalația;

- se aerisesc manometrele de măsură a presiunii montate la tubul Pitot-Prandtl și la diafragmă și se pregătesc pentru desfășurarea experimentului;

- se deschide robinetul R_2 la maxim, iar după stabilizarea regimului de curgere se efectuează măsurători la cele două manometre (H_{tub} , H_{diaf}); pentru verificarea debitului se preia volumul de la vasul etalonat (V) și timpul respectiv (t);

- se modifică deschiderea robinetului R_2 prin închidere cu un anumit număr de ture, astfel ca citirea la manometrul tubului Pitot – Prandtl să scadă cu circa 1/10 și se preiau valorile experimentale (H_{tub} , H_{diaf} , V , t);

- experimentele se repetă până la o valoare redusă a debitului, după care se trece la majorarea debitului și se repetă preluarea datelor;

- la terminarea experimentelor se închid robinetele de la manometre și robinetul R_2 al conductei.

Valorile experimentale se centralizează în tabelar (Tabel 7.1).

[illegible]

LUCRAREA 8

MĂSURAREA DEBITELOR PE CONDUCTE SUB PRESIUNE PRIN METODA STRANGULĂRII SECȚIUNII VÂNEI DE LICHID

8.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Debitele de fluid pot fi măsurate în mod direct sau indirect. Măsurarea indirectă a debitului se realizează prin preluarea unor parametri cu ajutorul cărora prin cunoașterea unei corelații între debit și aceștia se poate calcula valoarea debitului.

Măsurarea debitelor lichide prin metoda strângulării secțiunii vânei de lichid are la bază îngustarea secțiunii prin care circulă un lichid, respectiv crearea unei rezistențe la curgerea lichidului, fapt ce produce o pierdere locală de presiune, măsurată ca diferență între presiunea statică a fluidului în amonte și, respectiv aval de secțiunea de montaj a rezistenței hidraulice. Diferența de presiune creată este proporțională cu debitul tranzitat prin conductă.

Dispozitivele care creează strângularea secțiunii vânei de fluid se diferențiază după modul lor de structurare: ajutaj (Fig. 8.1); diafragmă (Fig. 8.2); tub Venturi (Fig. 8.3).

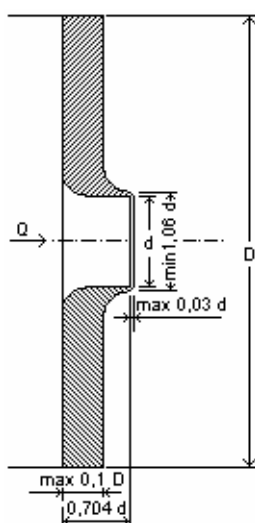


Fig. 8.1. Debitmetru cu ajutaj

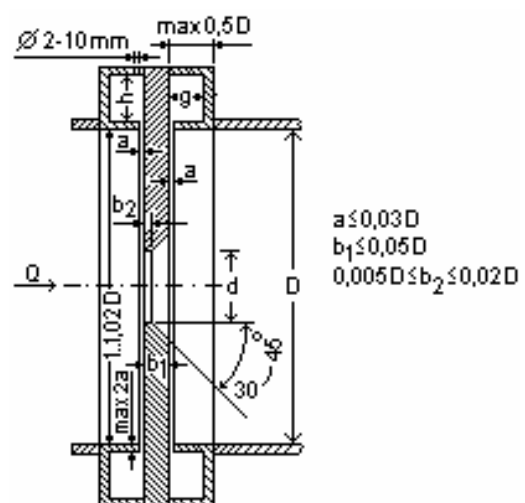


Fig. 8.2. Debitmetru cu diafragmă și cameră inelară

a. Ajutaje

Ajutajele sunt de două tipuri: ajutor obișnuit (tip ISA 1932) și ajutor cu rază mare. Ajutajele sunt executate conform STAS E3656-65. Ajutajele nu necesită etalonări individuale. Raportul de ștrangulare $\beta = d/D$ trebuie să fie cuprins între 0,20 – 0,80. Rugozitatea amonte a ajutorajelor trebuie să fie mai mică de $10^{-6}d$.

b. Diafragma

Diafragmele se execută cu o formă circulară sau segmentat, conform STAS E3655-65. Diafragmele nu necesită etalonări individuale. Raportul de ștrangulare $\beta = d/D$ se recomandă să fie cuprins între 0,2 și 0,8. Suprafața amonte nu trebuie să aibă abateri de la planeitate, iar rugozitatea nu trebuie să depășească $0,0003d$.

Ajutajele și diafragmele se prevăd cu prize de presiune în colțuri, tip vena contractată sau la flanșă. Prizele de presiune la colțuri pot fi individuale sau inelare și executate conform prevederilor STAS E7266-65.

c. Venturimetrul

Venturimetrul este executat în două variante: venturimetru clasic (lung) pentru care unghiul de divergență $\alpha = 7 - 14^\circ$ și venturimetru scurt, numit și ajutor Venturi, pentru care unghiul de divergență $\alpha = 14 - 25^\circ$. Partea convergentă poate fi conică, cu $\beta = 45^\circ$ sau conoidală.

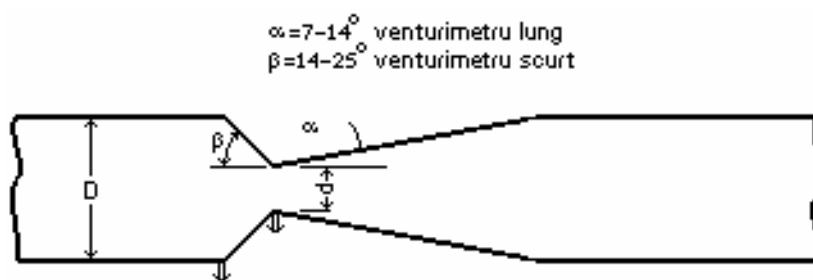


Fig. 8.3. Venturimetrul

Ajutajul, Venturimetrul și diafragma se amplasează pe tronsoane rectilinii de conductă. Pe tronsonul amonte nu trebuie să existe armături pe o distanță $(10-80)D$, iar în aval $(4-8)D$, diferențiat în funcție de tipul armăturii. Aceste distanțe se pot reduce la jumătate prin admiterea unor erori suplimentare asupra rezultatelor de 0,5%.

Între secțiunea amonte de dispozitiv și secțiunea strangulată, conform ecuației lui Bernoulli, ia naștere o diferență de presiune $\Delta p = \gamma \Delta h$, proporțională cu diferența termenilor cinetici sau cu debitul tranzitat.

Relația generală pentru calculul debitului volumetric este următoarea:

$$Q = \alpha \varepsilon A \sqrt{2g\Delta h}, \quad (8.1)$$

în care: Q este debitul (m^3/s); α - coeficientul de debit; ε - coeficient de detentă (pentru lichide $\varepsilon = 1$); A - secțiunea de curgere în secțiunea strangulată (m^2); g - accelerația gravitațională (m/s^2); Δh - diferența de presiune între secțiunea amonte și secțiunea strangulată (mCA).

Aparatele la care se cere precizie sporită se etalonează. Coeficientul α se determină pe cale experimentală.

8.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în etalonarea unei diafragme și a unui tub Venturi. Pe cale experimentală se va determina coeficientului α și se va trasa curba $Q = f(\Delta h)$ pentru fiecare aparat.

8.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală este formată din următoarele componente (Fig. 8.4):

- o conductă rectilinie alimentată de la rețeaua laboratorului prevăzută cu un robinet R_1 la alimentare și un robinet R_2 la evacuare; în secțiunea finală a conductei se montează un manometru cu element elastic pentru controlul presiunii; robinetul R_1 reglează presiunea, iar robinetul R_2 reglează debitul pe conductă;
- două dispozitive de măsură, primul un tub Venturi (TV), iar al doilea o diafragmă (D), ambele montate pe conductă prin intermediul flanșelor la distanțe determinate;
- aparate de măsură a diferențelor de presiune montate la aparatele de măsură: manometrul diferențial M_V la venturimetru, respectiv M_D la diafragmă (fig. 8.4);
- un vas etalonat (VE) pentru determinarea volumetrică a debitului, prevăzut cu un circuit basculant de alimentare și un tub piezometric de măsură

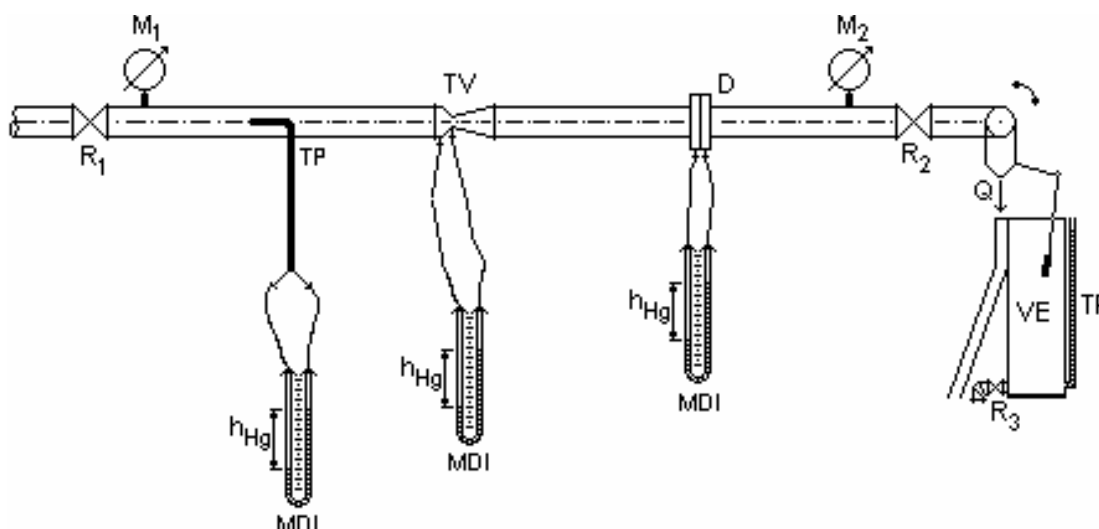


Fig. 8.4. Instalația experimentală

8.4. MOD DE LUCRU

Procesul experimental prevede parcurgerea următoarelor etape:

- Se măsoară elementele geometrice ale venturimetrului și diafragmei.
- Se alimentează conducta prin deschiderea robinetului R_1 și parțial a robinetului R_2 .
- Se verifică și se pregătesc pentru preluarea presiunilor manometrele diferențiale MV și MD.
- După stabilizarea regimului de curgere în conductă se măsoară diferențele de presiune la cele două manometre (Δh_v , Δh_d) și în același timp, volumul de apă și timpul corespunzător (V , t) la vasul etalonat; datele preluate de pe standul experimental se trec în tabelele de calcul (8.1. și 8.2). Datele pentru calculul debitului se preiau de cel puțin două ori.
- Se deschide robinetul R_2 cu un număr determinat de ture, pentru modificarea debitului, iar după stabilizarea regimului de curgere se repetă măsurătorile menționate anterior. După deschiderea totală a robinetului se continuă experimentul pe faza de închidere a robinetului, astfel că numărul de măsurători să fie de cel puțin 15.
- La terminarea experiențelor se închid robinetele de la manometre și robinetul de alimentare a conductei.

8.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Debitul se determină prin metoda volumetrică folosind relația:

$$Q = \frac{V}{t} \cdot (\text{m}^3/\text{s}). \quad (8.1)$$

Din ecuația (8.1), în care coeficientul de detentă $\varepsilon = 1$ în cazul apei rezultă expresia coeficientului de debit:

$$\alpha = \frac{Q}{A\sqrt{2g\Delta h}}. \quad (8.2)$$

Datele experimentale colectate și prelucrate se centralizează în Tabel 8.1. pentru diafragmă și Tabel 8.2. pentru venturimetru.

Cu ajutorul perechilor de valori $(Q, \Delta h_d)$, respectiv $(Q, \Delta h_v)$ se calculează coeficientul de debit la diafragmă α_d și α_v la venturimetru. Valorile coeficientului de debit se prelucerează statistic pentru a obține valoarea medie a acestuia. Cu ajutorul coeficientului de debit mediu și pentru un șir de valori crescătoare Δh_d respectiv Δh_v se calculează debitul corespunzător.

Perechile de valori $(Q, \Delta h_d)$ calculate la diafragmă, respectiv $(Q, \Delta h_v)$ la venturimetru se trasează grafic corelația

$$Q = f_1(\Delta h_d), \quad Q = f_2(\Delta h_v), \quad (8.3)$$

respectiv cheia limnometrică a fiecărui aparat de măsură.

Tabel 8.1. Etalonarea diafragmei

Nr. ct.	V_i (l)	t_i (sec.)	Q_i (l/s)	$\Delta h_{d,i}$ (mca)	$\alpha_{d,i}$	Obs.	Δh_d (mca)	Q (l/s)
1								
.								
15								
					$\alpha_{d,med}$			

Tabel 8.2. Etalonarea tubului Venturi

Nr. ct.	V_i (l)	t_i (sec.)	Q_i (l/s)	$\Delta h_{v,i}$ (mca)	α_v	Obs.	Δh_v (mca)	Q (l/s)
1								
.								
15								
					$\alpha_{v,med}$			

LUCRAREA 9

APLICAȚII ALE LEGII LUI BERNOULLI. BUTELIA MARIOTTE. EJECTORUL

Aplicațiile tehnice ale fenomenelor supuse legii lui Bernoulli sunt multiple. Câteva aplicații tehnice sunt foarte utile și interesante, cum sunt butelia Mariotte, ejectorul, fântâna lui Heron etc.

9.1. BUTELIA MARIOTTE

9.1.1. Considerații generale

Butelia Mariotte (fig. 9.1) este un vas închis, umplut cu lichid, în care pătrunde un tub care este în legătură cu atmosfera. Vasul se golește prin orificiul practicat în perete. Viteza sub care se scurge apa din vas are trei faze:

Fig. 9.1. Schema buteliei Mariotte:

1 - vas cu lichid; 2 - tub de aerare; 3 - orificiu de scurgere

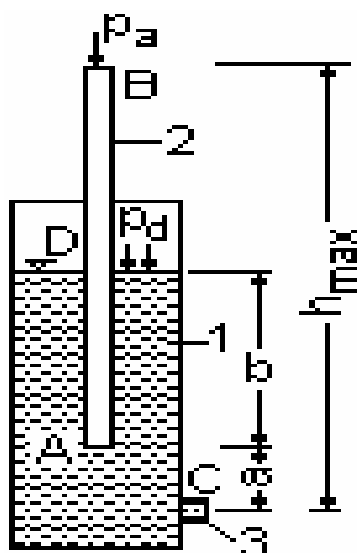


Fig. 9.1. Schema buteliei Mariotte: 1. - vas cu lichid;
2. - tub de aerare; 3. - orificiu de scurgere

Viteza sub care se scurge apa din vas prezintă trei faze:

- la început, viteza este variabilă cu h , scade de la $V_1 = \sqrt{2gh_{max}}$ la $V_2 = \sqrt{2ga}$, cu scăderea nivelului lichidului în tub, de la h_{max} la a (conform ecuației lui Bernoulli, aplicată între B și C);

- după ce nivelul lichidului în tub a ajuns în punctul A, viteza $V_2 = \sqrt{2ga}$ rămâne constantă, iar curgerea are loc sub sarcina a ; în punctul A acționează presiunea atmosferică până în momentul când nivelul lichidului din vas atinge nivelul A. Ecuația lui Bernoulli aplicată între punctele A și C arată constanța vitezei. În vas pătrunde aer prin tub. Presiunea la nivelul suprafeței lichidului este mai mică decât presiunea atmosferică $p_d = p_a - \gamma b$.

- când nivelul lichidului din vas scade sub punctul A, viteza, respectiv debitul devin variabile cu scăderea sarcinii până la punctul C.

Butelia Mariotte are aplicații în tehnică și practica de laborator, pentru menținerea (dozarea) unor viteze (debite) constante ale lichidelor sub nivel variabil.

9.1.2. Scopul lucrării

Scopul lucrării constă în verificarea funcționării buteliei Mariotte.

9.1.3. Instalația experimentală

Instalația experimentală este constituită dintr-o butelie Mariotte cu patru tuburi fixe pentru diferite sarcini (fig. 9.2). Butelia este prevăzută cu un dop (3) pentru umplere cu lichid. Orificiul de scurgere (4) poate avea diferite diametre prin schimbarea diafragmei.

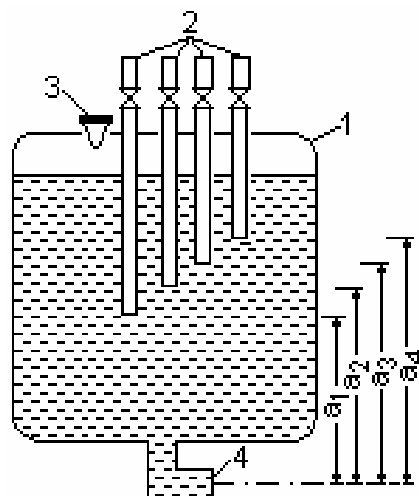


Fig. 9.2. Schema buteliei Mariotte din laborator: 1 - vas de sticlă; 2 - tuburi de sticlă cu robinet; 3 - dop de umplere; 4 - orificiul schimbabil.

9.1.4. Modul de lucru

Se fixează pe butelia Mariotte diafragma cu orificiul dorit. Se astupă orificiul (4) și prin dopul (3) se măsoară vasul cu apă. Se deschide câte un robinet (2) și se măsoară debitul prin metoda volumetrică de cel puțin de trei ori, cu un cilindru gradat și un cronometru. Concomitent, se observă distanța de bătaie a vânei lichide. La măsurători, nivelul lichidului din vas trebuie să fie deasupra muchiei tubului. Se fac determinări și în cazul când lichidul este sub nivelul muchiei tubului, observând și în acest caz distanța de bătaie a vânei.

Valorile experimentale se trec în tabelul 9.1.

9.1.5. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Se calculează debitele și vitezele pentru fiecare determinare și se observă evoluția debitelor când nivelul apei este deasupra și sub muchia tubului. Valorile calculate și concluziile se trec la observații.

9.2. EJECTORUL

9.2.1. Considerații generale

Ejectorul este o instalație care utilizează un lichid cu viteză mare de ieșire printr-un confuzor (1), unde se produce depresiune, aspect ce permite aspirarea unei alte cantități de lichid prin conducta (2) dintr-un rezervor inferior și refularea amestecului prin difuzorul (3) într-un rezervor amplasat la o cotă superioară (fig. 9.3).

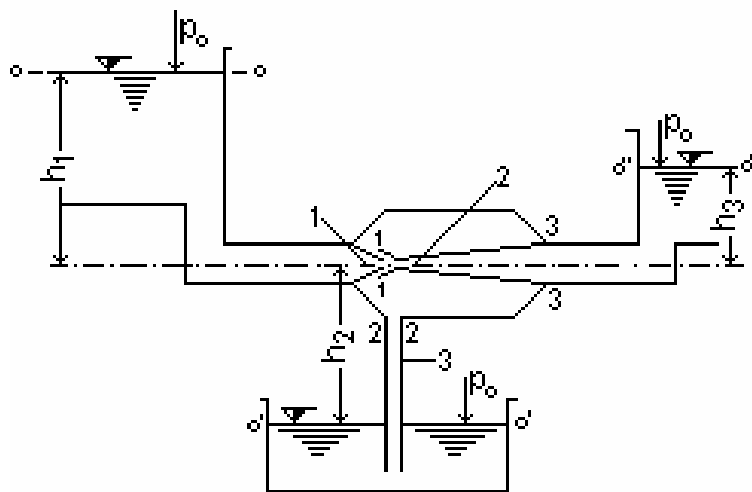


Fig. 9.3. Schema ejectorului: 1 - confuzor;
2 - difuzor; 3 - conductă de aspirație

Elementele geometrice și hidraulice ale ejectorului se calculează din ecuațiile următoare (Bernoulli, de continuitate, de conservare a energiei):

$$\begin{aligned} \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\gamma} + h_1 &= \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + 0 \\ \frac{v_0'^2}{2g} + \frac{p_0'}{\gamma} - h_2 &= \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + 0 \\ \frac{v_0''^2}{2g} + \frac{p_0''}{\gamma} + h_3 &= \frac{v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\gamma} + 0 \end{aligned} \quad (9.1)$$

$$Q_1 = A_1 v_1 \quad Q_2 = A_2 v_2 \quad Q_3 = A_3 v_3 \quad (9.2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (9.3)$$

$$\gamma h_1 Q_1 = \gamma h_2 Q_2 + \gamma h_3 Q_3 \quad (9.4)$$

$$\frac{p_1}{\gamma} \approx \frac{p_2}{\gamma} \quad (9.5)$$

Datorită transformării energiei potențiale din secțiunea 0-0 în energia cinetică din secțiunea 1-1, în acest punct se poate realiza o depresiune, astfel că prin conducta (2) va fi aspirată o cantitate de lichid. La un debit constant la confuzor și având un robinet pe conducta (2), se poate realiza un debit determinat aspirat. Existând posibilitatea de reglare a raportului Q_1 / Q_2 , ejectorul poate fi folosit ca instalație pentru amestecarea (dozarea) a două lichide într-o anumită proporție. Această caracteristică stă la baza folosirii ejectoarelor ca dispozitiv de dozare a îngrășămintelor în apa de irigație sau de clorinare a apei potabile. Tot odată, ejectorul poate fi folosit ca pompă de vid. Vidul maxim creat corespunde debitului $Q_2 = 0$.

9.2.2. Scopul lucrării

În laborator se vor studia un ejector și o pompă de vid din punct de vedere constructiv. Se vor ridica caracteristicile hidraulice ale unui ejector pentru a fi folosit ca distribuitor de îngrășământ (raport de soluție distribuită 1/100) și ca pompă de vid.

9.2.3. Instalația de lucru

Instalația experimentală (fig. 9.4) se alimentează de la rețeaua de alimentare a laboratorului, prin robinetele $R_{1,2,3}$. Linia ejectorului este alimentată prin robinetul R_2 , pe care sunt montate, în serie, un contor de apă CA, manometrul M_1 , ejectorul E, manometrul M_3 și robinetul de reglare presiunilor și debitelor, R_4 . Linia de aspirație se compune din rezervorul de nivel constant (RNC) alimentat de robinetul R_3 ; menținerea constantă a nivelului se obține cu ajutorul deversorului (D). Debitul de lichid în surplus se evacuează în conducta de evacuare (CE). Ejectorul aspiră lichidul din rezervorul cu nivel constant printr-o conductă de aspirație pe care sunt montate un robinet (R_5) și un rotametrul (QRM).

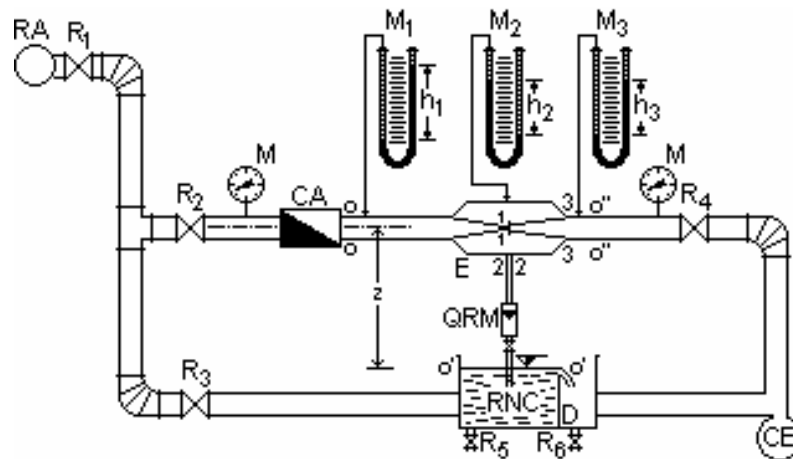


Fig. 9.4. Instalația experimentală: $D_0 = 20$ mm;
 $D_1 = 6$ mm; $D_2 = 10$ mm; $D_3 = 20$ mm

9.2.4. Modul de lucru

Se studiază un ejector și o pompă de vid. Se deschid robinetele R_1 și R_2 , astfel încât să se umple rezervorul cu nivel constant, robinetele R_2 , R_4 și R_6 fiind închise.

Se deschid robinetele R_2 , R_4 și R_5 , astfel ca manometrul M să nu indice mai mult de 1 bar și $M' - 0,5$ bar. Se urmărește ca presiunea la M să nu depășească în nici un caz 1 bar.

Se fac citirile la manometrele M_1 , M_2 , M_3 , la rotametrul și se măsoară debitul volumetric cu ajutorul contorului și cu un cronometru (volumul trebuie să fie de cel puțin 100 l). Valorile se trec în tabelul 9.2. Măsurătorile se repetă de cel puțin trei ori pentru aceleași caracteristici hidraulice. Se închide robinetul R_5 complet și se citesc din nou indicațiile la manometre și se măsoară debitul la contor. În acest caz se realizează vidul maxim în camera de amestec. Se închid robinetele $R_1 - R_5$, în ordine.

9.2.5. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Pentru ejectorul din fig. 9.4, ecuațiile (1-5) devin:

$$\begin{aligned} \frac{v_0^2}{2g} + \frac{p_0}{\gamma} &= \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} \\ -z &= \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} \end{aligned} \quad (9.1')$$

$$Q_1 = A_1 v_1 \quad Q_2 = A_2 v_2 \quad Q_3 = A_3 v_3 \quad (9.2')$$

$$Q_3 = Q_1 + Q_2 \quad (9.3')$$

$$\left(\frac{p_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} \right) Q_1 = z Q_2 + \left(\frac{p_3}{\gamma} + \frac{v_3^2}{2g} \right) Q_3 \quad (9.4')$$

Se verifică respectarea ecuațiilor (9.1') și (9.4'). Rezultatele calculelor se trec în tabelul 9.2. Pe baza rezultatelor se formulează observațiile și concluziile.

Tabel 9.1. Rezultatele experimentale la butelia Mariotte

Nr. crt.	V (cm ³)	t (sec)	Q (cm ³ /s)	d (mm)	v (m/s)	Observații
1						

Tabel 9.2. Rezultatele experimentale la ejector

Nr. crt.	V (l)	t (s)	Q_1 (l/s)	Q_2 (l/h)	Q_3 (l/s)	Q_2/Q_1
1						
2						

Tabel 9.2. (continuare) Rezultatele experimentale la ejector

Nr. crt.	$h_1 = p_0/\gamma$		$h_2 = p_1/\gamma$		$h_3 = p_3/\gamma$		z (m)	Q_3 (l/s)	v_0 (m/s)	v_1 v_2 v_3 (m/s)
	mm Hg	mca	mm Hg	mca	mm Hg	mca				
1										
2										

LUCRAREA 10

DETERMINAREA REACȚIUNII DATORITĂ IMPULSULUI LA IEȘIREA APEI DINTR-O CONDUCTĂ

10.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Acțiunea fluidului asupra pereților rigizi a unui tub de curent se determină prin folosirea ecuației impulsului:

$$\rho Q(\vec{v}_2 - \vec{v}_1) = \sum \vec{F}_{ex}, \quad (10.1)$$

unde Q este debitul transportat prin tubul de curent; v_1, v_2 – viteza în secțiunea de intrare respectiv de ieșire; $\sum F_{ex}$ – suma forțelor exterioare care acționează asupra domeniului ocupat de fluid.

Reacțiunea fluidului $\vec{R}$ asupra pereților conductei (fig. 10.1) se calculează cu ecuația (10.1) pusă sub forma:

$$\vec{R} = \vec{G} + \vec{n}_1 p_1 A_1 + \vec{n}_2 p_2 A_2 + \rho Q \vec{v}_1 - \rho Q \vec{v}_2 \quad (10.2)$$

unde $\vec{G}$ este forța masică a fluidului; $\vec{n}_1 p_1 A_1$ – forța de presiune pe suprafața A_1 , având orientarea versorului $\vec{n}_1$; $\vec{n}_2 p_2 A_2$ – forța de presiune pe suprafața A_2 , având orientarea versorului $\vec{n}_2$; $\beta \rho Q v_1$ – forța de inerție la intrare; $\beta \rho Q v_2$ – forța de inerție la ieșire.

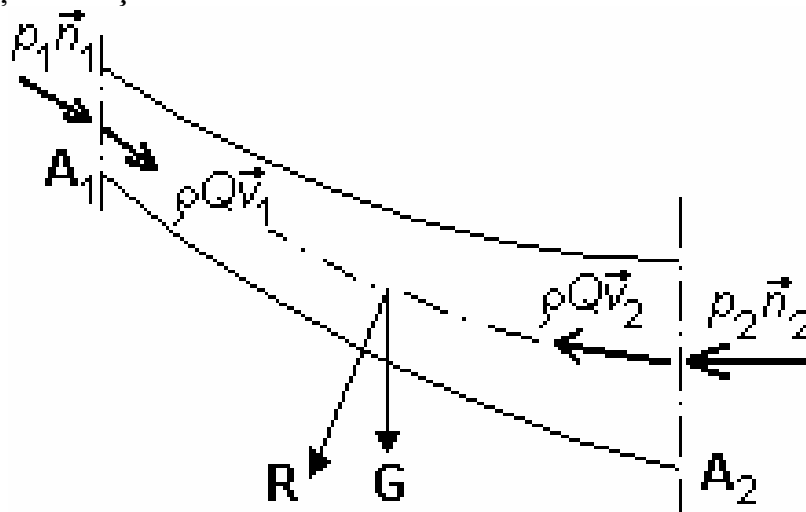


Figura 10.1. Reacția dinamică la un tub de curent

Punctul de aplicație al forței $\vec{R}$ se calculează din ecuația de momente a forțelor față de un punct oarecare, sau din proiecția ecuației vectoriale pe axele unui sistem de coordonate.

Cu ecuația (10.2) se poate calcula reacțiunea datorită impulsului unui curent de lichid la ieșirea dintr-o conductă.

10.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în determinarea experimentală a reacțiunii datorită impulsului la ieșirea unui curent de apă dintr-o conductă și compararea acesteia cu valoarea obținută pe cale teoretică.

10.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig. 10.2) se compune dintr-un tub (1) îndoit la partea inferioară sub un unghi de 90° . La partea inferioară tubul se termină printr-o strângulare cu diametrul mic (2), iar la partea superioară tubul este racordat la rețeaua de alimentare printr-un cuplaj flexibil (3). Pe tub este fixat un taler (4) pe care se pun diferite greutăți (5), în vederea echilibrării momentului rezultat din forța de reacție. La partea inferioară a tubului este atașat un ac indicator (6) cu rolul de stabilire corecte a poziției tubului.

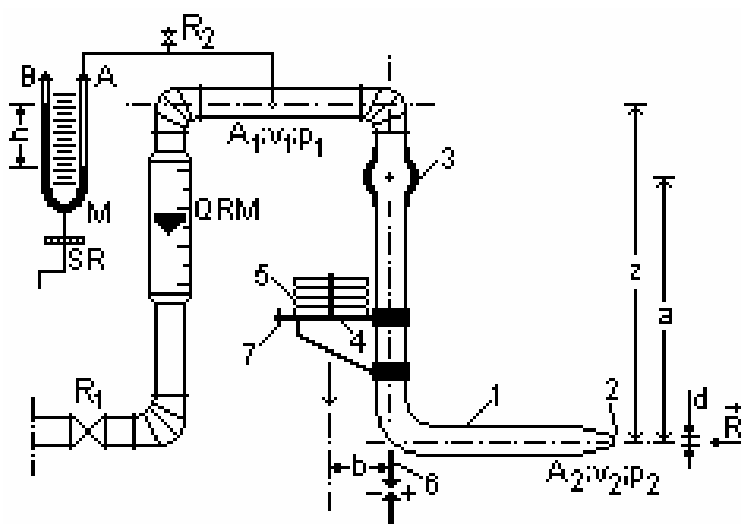


Fig.10.2. Schema instalației experimentale

Pe conducta de alimentare este montat un manometru (M) cu tub U și mercur. Pentru accesibilitatea preluării înălțimilor de presiune de la manometru, acesta poate fi deplasat în plan vertical (SR), astfel ca în momentul

citirilor nivelul mercurului să fie la nivelul axului conductei. Pe circuitul de alimentare a manometrului este montat un robinet R_2 cu rol de aerisire.

Debitul tranzitat pe instalație se măsoară cu un rotametrul (QRM). Reglarea debitelor și presiunilor pe instalație se realizează prin manevrarea robinetului R_1 .

10.4. MODUL DE LUCRU

Operațiile experimentale se execută în următoarea succesiune:

a. Se verifică componentele instalației experimentale, care trebuie să prezinte următoarele caracteristici inițiale:

- acul indicator (6) trebuie să fie în dreptul reperului; în caz contrar se acționează șurubul de reglare (7) până ce indicatorul este în dreptul reperului;
- furtunul de transmitere a presiunilor trebuie să conțină numai apă, în caz contrar se aerisește manometrul cu ajutorul robinetului R_2 .

b. Se măsoară elementele geometrice ale instalației ce vor fi folosite în calculele teoretice: d – diametrul ștuțului final al conductei, a – brațul forței de reacțiune, b – brațul forței de greutate.

c. Pe talerul (4) se fixează o greutate etalonată G sub acțiunea căreia acul indicator se deplasează. Deschizând încet robinetul până ce acul indicator revine în dreptul reperului, situație în care se realizează echilibrarea momentelor date de greutatea G și forța de reacție datorită impulsului la ieșirea apei din conductă.

d. Se citește indicația rotametrelui (QRM) și a manometrului (M) adus cu ajutorul șurubului (SR) în poziția în care axul conductei coincide cu nivelul mercurului din brațul A.

e. Se repetă operațiile de la punctul c pentru greutăți dispuse pe talerul (4), cu valori $2G$, $3G$ și $4G$.

f. La terminarea determinărilor se închide robinetul R_1 și se scot greutățile de pe taler.

Datele experimentele preluate de pe stand se trec în Tabel 10.1.

10.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE:

Rezultatele experimentale sunt stocate în Tabel 10.1, iar datele prelucrate în Tabel. 10.2.

Tabel 10.1. Date experimentale preluate de pe stand

Nr. crt.	Q		H		G (N)	Obs
	l/min	m ³ /s	mmHg	mca		
1						
2						
3						
4						

Tabel 10.2. Rezultate experimentale prelucrate

Nr. crt.	Q m ³ /s	R* (N)	H mca	ζ	R** (N)	G (N)	R (N)	δ*	δ**	Obs
1										
2										
3										
4										

$$\delta^* = \frac{R - R^*}{R} 100 \quad \delta^{**} = \frac{R - R^{**}}{R} 100$$

Calculul reacțiunii R datorită impulsului la ieșirea apei din conductă se efectuează astfel:

- din condiția de echilibru a momentelor forțelor rezultă:

$$G \cdot b = R \cdot a, \quad R = \frac{G \cdot b}{a}; \quad (10.3)$$

– din teorema impulsului proiectată pe axa orizontală a conductei rezultă:

$$-R^* = \rho Q v^2 = \rho A_2 v_2^2. \quad (10.4)$$

Cunoscând din măsurători debitul Q și diametrul d_2 , ecuația (10.4) capătă forma:

$$R^* = \frac{4 \beta \rho Q^2}{\pi d_2^5}. \quad (10.5)$$

Ecuatia (10.4) se poate calcula și pe baza măsurătorilor de presiune la manometrul M și cunoscând caracteristica aparatului ζ .

Din ecuația lui Bernoulli scrisă între secțiunile 1 și 2 se obține:

$$H + z + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{r_{1-2}} \quad H = \frac{\alpha(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + h_{r_{1-2}} - z \quad (10.6)$$

Pierderile de sarcină $h_{r_{1-2}}$ și termenul cinetic au relațiile de definiție:

$$h_{r_{1-2}} - z = \zeta \frac{v_2^2}{2g} \quad (10.7)$$

$$\frac{\alpha v_1^2}{2g} = \frac{\alpha v_2^2}{2g} \left(\frac{A_2}{A_1} \right). \quad (10.8)$$

Pentru un raport $(A_2/A_1)^2 < 0,001$, termenul $\alpha v_1^2/2g$ din ecuația (10.6) se poate neglija și rezultă:

$$v_2^2 = \frac{2gH}{\alpha + \zeta}, \quad (10.9)$$

iar ecuația (10.4) devine:

$$R^{**} = \beta \rho A_2 \frac{2gH}{\alpha + \zeta}. \quad (10.10)$$

Calcululele se vor efectua pentru următorii parametri: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$; $\alpha = 1,10$; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Valorile coeficientului $\zeta = f(H)$ se preiau din literatura de specialitate.

Reacțiunea rezultată din ecuația (10.3) se compara cu valoarea obținută din ecuația (10.5) și (10.10) prin calculul erorile relative.

LUCRAREA 11

MĂSURAREA DEBITULUI PE CONDUCTE SUB PRESIUNE CU DEBITMETRUL COT

11.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Un cot sau o curbă a unei conducte sub presiune pot fi adaptate ca instrumente de măsură indirectă a debitului. Datorită forței centrifuge, între partea convexă și concavă a cotului (sau curbei) se creează o diferență de presiune, care este proporțională cu unele elemente geometrice ale cotului respectiv curbei. Cu ajutorul diferenței de presiune se poate determina viteza lichidului în conductă și implicit debitul.

Conform teoremei impulsului, în cot acționează o forță F (fig. 11.1), care se exprimă prin relația:

$$F = \frac{\beta \rho Q v}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (11.1)$$

în care: Q este debitul tranzitat; v – viteza apei în cotul de conductă; ρ - densitatea lichidului; α - unghiul cotului; β - coeficient.

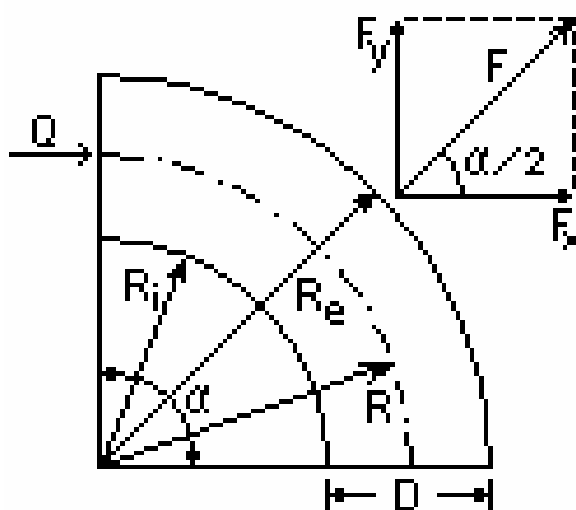


Fig. 11.1. Schema forțelor ce se dezvoltă în cotul unei conducte: R_e – raza exterioară a cotului; R_i – raza interioară a cotului; R – raza medie a cotului; D – diametrul conductei.

Forța F acționează pe suprafața:

$$S = \frac{2\pi R\alpha^0}{360^0}. \quad (11.2)$$

Presiunea medie sau diferența de presiune medie ce acționează pe partea concavă și convexă a cotului are expresia:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\beta\rho Qv}{\cos\frac{\alpha}{2}}. \quad (11.3)$$

Din ecuația (11.3), după o serie de transformări, se obține:

$$Q = \sqrt{\frac{\frac{R}{D}\alpha^0 \cdot 4 \cdot \cos\frac{\alpha}{2}}{\beta \cdot 360^0}} \cdot A\sqrt{2g\Delta h}, \quad (11.4)$$

care, pentru un cot de 90^0 , rezultă sub forma:

$$Q = \sqrt{\frac{R}{D\sqrt{2}}} \cdot A\sqrt{2g\Delta h}. \quad (11.5)$$

Mișcarea elicoidală a lichidului în cot, ovalitatea cotului și eventualele neregularități sau fenomene secundare se înglobează într-un coeficient de corecție k , după care relațiile (11.4) și (11.5) devin:

$$Q = k\sqrt{\frac{\frac{R}{D}\alpha^0 \cdot 4 \cdot \cos\frac{\alpha}{2}}{\beta \cdot 360^0}} \cdot A\sqrt{2g\Delta h} \quad (11.4')$$

și

$$Q = k\sqrt{\frac{R}{D\sqrt{2}}} \cdot A\sqrt{2g\Delta h}. \quad (11.5')$$

În ecuațiile (11.4), (11.5), (11.4') și (11.5') notațiile au următoarea semnificație: Q este debitul, (m^3/s); Δh – diferența de presiune între partea concavă și cea convexă ale cotului, (mca); α - unghiul de realizare a cotului; R – raza de curbură a cotului, (m); D – diametrul cotului, (m); A – secțiunea transversală a cotului, (m^2); g – accelerația gravitațională, (m/s^2); k – coeficientul de corecție.

Prin măsurarea diferenței de presiune Δh între partea concavă și cea convexă a cotului se poate determina în mod indirect debitul conductei.

Valorile $\sqrt{R/D\sqrt{2}}$ funcție de raportul R/D , pentru un cot de 90^0 , sunt redate în tabelul 11.1:

Tabel 11.1 Valorile $\sqrt{R/D\sqrt{2}}$

R/D	1,0	1,25	1,50	1,75	2,0	2,25	2,50	2,75	3,00
$\sqrt{R/D\sqrt{2}}$	0,841	0,940	1,029	1,112	1,189	1,261	1,329	1,39	1,46

Pentru creșterea preciziei măsurătorilor este preferabil ca poziția cotului să fie într-un plan orizontal. Cotul trebuie să unească două tronsoane de conductă rectilinii, pe care să nu fie montate fittinguri și armături pe o lungime $50D$ în amonte, respectiv $20D$ în aval.

11.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în etalonarea debitmetrului tip cot, calculul și trasarea curbei $Q = f(h)$.

11.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală este compusă dintr-o conductă amplasată în plan orizontal, care prezintă un cot (2) cu diametrul și raza de curbura dată (fig. 11.2). În amonte și în aval de cot sunt respectate condițiile de montaj pentru a putea fi considerat instrument de măsură a debitului (cot debitmetru).

În partea convexă și concavă ale cotului sunt amplasate prizele de presiune (p , p'), cu posibilitate de curățire. Ca element secundar, se folosește un manometru diferențial (MD).

Pe linia de evacuare (3) este montat un robinet R_1 pentru reglarea debitelor. Debitul se măsoară volumetric cu un vas etalonat. Alimentarea instalației se realizează cu presiune constantă.

11.4. MODUL DE LUCRU

Operațiile experimentale se desfășoară prin parcurgerea următoarelor etape:

1. Se măsoară elementele geometrice ale debitmetrului cot. Se pregătește manometrul (MD) și vasul etalonat pentru măsurători.
2. Se alimentează instalația experimentală prin deschiderea treptată a robinetului de secțiunea amonte. Concomitent se aerisește instalația și furtunurile de la prizele de presiune.

3. După stabilizarea regimului de curgere pentru deschiderea inițială a robinetului R_1 , respectiv valoarea cea mai redusă, se efectuează citirea diferenței de presiune la manometrul (MD), verificată de trei ori. Concomitent se măsoară volumul de apă (V) la vasul etalonat și timpul corespunzător (t); operația se repetă de cel puțin de două ori la fiecare deschidere a robinetului R_1 .
4. Operațiile prezentate la pct. 3 se repetă pentru alte deschideri ale robinetului R_1 . Robinetul se deschide în mod crescător până la valoarea maximă și apoi descrescător până aproape de valoarea de închidere. Numărul experimentelor va fi de cel puțin 15. Datele preluate prin măsurători sunt colectate în Tabel 11.2.

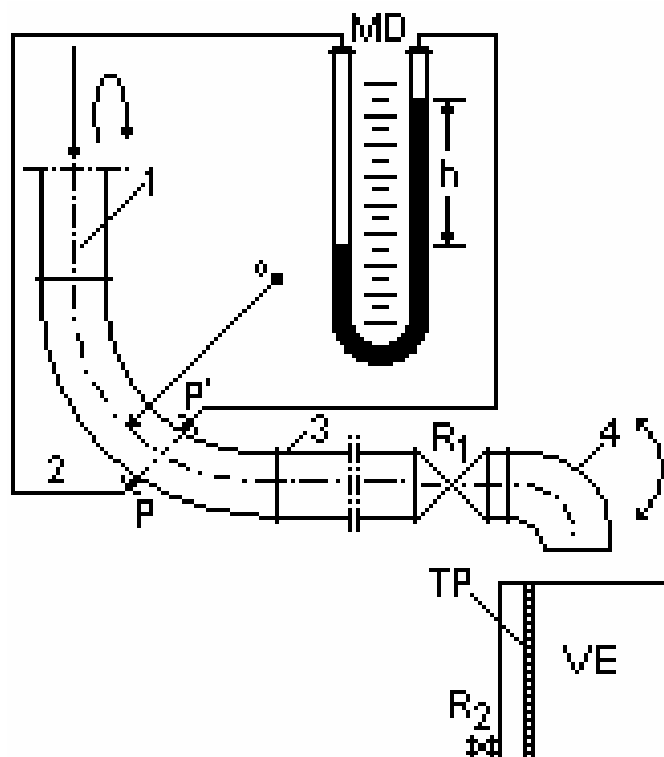


Fig. 11.2. Instalație experimentală: 1 - tronson amonte de conductă; 2 - debitmetru cot; 3 - tronson aval de conductă; 4 - cot oscilant; R_1 , R_2 – robinete; p_1 , p_2 – prize de presiune; VE – vas etalonat; TP – tub piezometric; MD – manometru diferențial

11.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Din relația (11.5'), prin măsurători experimentale, se determină parametrul k al aparatului.

$$k_i = \frac{Q_i}{A\sqrt{2g\Delta h_i} \sqrt{\frac{R}{D\sqrt{2}}}}. \quad (11.6)$$

Valorile coeficientului k_i obținute cu relația se prelucrează statistic (Tabel 11.2).

Se calculează și se trasează grafic corelația debit (Q)– diferență de presiune (Δh) folosind relația:

$$Q = kA\sqrt{\frac{R}{D\sqrt{2}}} \sqrt{2g\Delta h} = C\sqrt{\Delta h}, \quad (11.7)$$

unde valorile calculate se centralizează în Tabel 11.3.

Tabel 11.2. Coeficientul k_i al debitmetrului cot

Nr. crt.	Δh_i (mca)	v_i (l)	t_i (sec)	Q_i (l/sec)	k_i	Elemente geometrice R, D	Obs.

Tabelul 11.3 Cheia limnometrică la debitmetrul cot

Δh (mca)								
Q (l/s)								

LUCRAREA 12

DETERMINAREA NUMĂRULUI CRITIC REYNOLDS

12.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Mișcarea fluidelor vâscoase în sisteme hidraulice sub presiune și cu nivel liber se manifestă în două regimuri de curgere diferențiate ca structură fizică și parametri funcționali. Cele două tipuri de mișcare :

- mișcare laminară sau regim de curgere laminar;
- mișcare turbulentă sau regim de curgere turbulent.

Trecerea de la mișcarea laminară la cea turbulentă se realizează prin intermediul unui al treilea tip de mișcare / regim de curgere, denumită “mișcare de tranziție”. Aceasta este redusă ca extindere și stabilitate în timp. Trecerea de la mișcarea laminară la cea turbulentă este ireversibilă.

În regimul de mișcare laminar, particulele de lichid se deplasează paralel cu axa conductei pe, traiectorii separate și paralele între ele. Mișcările secundare, pe alte direcții decât axul conductei sunt nesemnificative.

Regimul de curgere laminar se întâlnește în practică la mișcarea lichidelor cu viscozitate mare (țitei, ulei), sau în cazul mișcării în spații / tuburi cu dimensiuni / de diametre foarte mici.

Regimul turbulent se caracterizează printr-o mișcare haotică, dezordonată a particulelor de lichid, firele de curent se amestecă între ele, apar turbioane și vârtejuri, viteza are variații atât în plan longitudinal, cât și în plan transversal.

Regimul de mișcare turbulent este cel mai frecvent întâlnit în domeniul hidrotehnic, respectiv la mișcarea apei în canale, râuri, conducte etc.

Criteriul pentru cunoașterea regimului de mișcare este dat de numărul lui Reynolds (notat Re) și care se exprimă în cazul sistemelor hidraulice sub presiune formate din conducte circulare sub forma:

$$Re_d = \frac{v \cdot d}{\nu}, \quad (12.1)$$

sau în cazul unor conducte de altă formă (poligonală, curbilinie, mixtă etc.):

$$Re_d = \frac{v \cdot l}{\nu}, \quad (12.2)$$

relație valabilă și la mișcarea în jurul unui corp solid, iar în cazul sistemelor cu nivel liber:

$$Re_R = \frac{v \cdot R}{\nu}, \quad (12.2)$$

în care: v este viteza medie de curgere a lichidului în conductă; d – diametrul conductei; ν – coeficient de viscozitate cinematică; l – lungime caracteristică; R – raza hidraulică pentru albi deschise.

Separarea mișcării laminare de cea turbulentă se realizează la un anumit număr Re în funcție de caracteristicile geometrice, fizice și cinematice ale sistemului hidraulic. Acest număr se numește *număr Reynolds critic* și se notează Re_{cr} . Numărul Re_{cr} se obține pe cale experimentală pentru fiecare tip de fluid și în anumite condiții de existență a sistemului hidraulic.

Determinarea regimului de mișcare a lichidelor se realizează prin compararea numărului Reynolds calculat (ecuațiile 12.1, 12.2 și 12.3) cu numărul Reynolds critic, Re_{cr} :

- pentru $Re < Re_{cr}$ - regim laminar;
- pentru $Re > Re_{cr}$ - regim turbulent.

Fenomenul trecerii de la regimul de curgere laminar la cel turbulent este foarte complex și depinde de mai mulți factori.

Valoarea numărului Reynolds critic pentru conducte cilindrice care transportă apă se calculează cu relația:

$$Re_{cr} = \frac{v \cdot d}{\nu} \cong 1600 \dots 4000, \quad (12.3)$$

unde valorile mici corespund conductelor cu rugozitate mare și foarte mare (oțel, beton, fontă); valorile mari ale Re_{cr} corespund conductelor cu rugozitate mică și foarte mică (mase plastice, sticlă).

Ca o valoare medie în calcule de verificare se acceptă $Re_{cr} = 2320$. În general se admite că pentru $Re < 2320$ mișcarea apei în conducte are loc în regim laminar.

12.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în vizualizarea regimului de curgere într-o conductă și determinarea numărului Reynolds. Numărul Re obținut prin experimentări la trecerea dintre cele două regimuri de curgere se compară cu Re_{cr} obținut pe cale teoretică.

12.3. DESCRIEREA INSTALAȚIEI EXPERIMENTALE

Vizualizarea regimului de curgere și determinarea experimentală a numerelor Re și Re_{cr} se face cu ajutorul unei instalații structurate pe următoarele elemente (fig. 12.1):

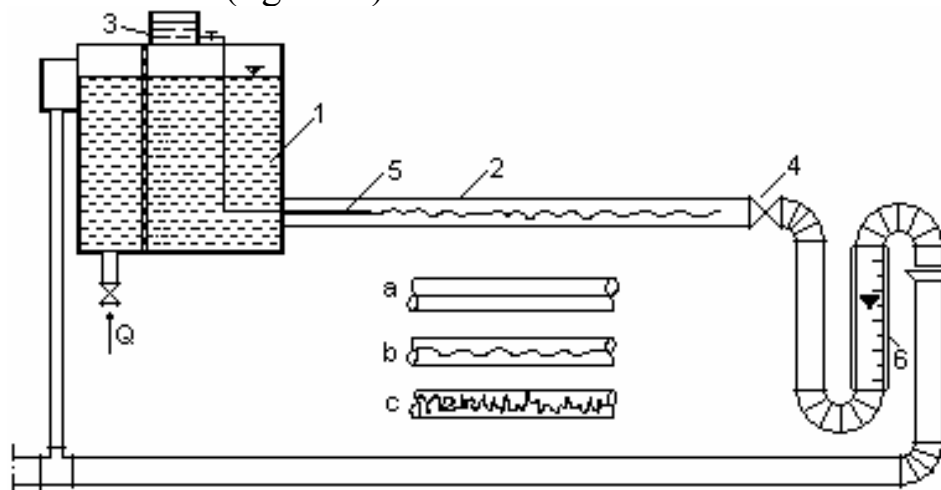


Fig. 12.1. Instalația experimentală

- rezervor de apă cu nivel constant cu preaplin (1) alimentat prin intermediul unui robinet din instalația de conducte a laboratorului;
- un tronson de conductă de formă cilindrică executat din sticlă (2), care este racordat la rezervorul (1);
- un rezervor umplut cu lichid colorat (3) și prevăzut la evacuare cu un robinet pentru reglarea debitului; rezervorul (3) este montat la partea superioară a rezervorului (1);
- un robinet (4) pe conducta de studiu pentru reglarea debitului;
- injector (5) pentru introducerea lichidului colorat în conducta de sticlă experimentală;
- un rotametrul pentru măsurarea debitului (6).

12.4. MODUL DE LUCRU

Operațiile experimentale se desfășoară în următoarea succesiune:

1. Se deschide robinetul de alimentare a instalației și se umple rezervorul până ce apa curge prin preaplin, situație în care se obține un nivel constant în rezervor.

2. Se deschide robinetul de pe conducta experimentală cu un număr foarte mic de ture și se așteaptă până când mișcarea se stabilizează.

3. Se deschide robinetul de la rezervorul de lichid colorat, care prin intermediul injectorului va intra în conductă sub forma unui fir subțire, vizualizat prin culoarea sa.

4. Se deschide cu $\frac{1}{4} \dots 1$ ture robinetul de pe conducta experimentală în condiția ca firul de lichid colorat să își mențină liniaritatea (fig. 12.1.b). Se preia debitul conform citirii la rotametrul.

5. În momentul în care firul de lichid colorat începe să se onduleze se citește valoarea la rotametrul. Pentru acest moment se determină debitul și prin metoda volumetrică.

6. Se deschide robinetul în mod lin. până când firul de lichid colorat se amestecă complet cu lichidul din conductă (fig. 12.1.d). Pentru acest moment se determină debitul la rotametrul și prin metoda volumetrică.

7. Se reiau experiențele conform celor prezentate la pct. 4...6. stabilește un regim de scurgere prin tub, în așa fel încât să se poată vedea clar firul colorat. Debitul tranzitat se citește la rotametrul (6).

8. După terminarea experiențelor, se închid robinetele de alimentare a instalației și rezervorului cu lichid colorat.

Datele experimentale se trec în tabelul 12.1 Numărul Reynolds se calculează cu relația cunoscută.

12.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Numărul Re și Re_{cr} se calculează cu relația (12.1). Debitul preluat de la rotametrul se transpune în S.I., iar pentru determinarea prin metoda volumetrică se folosesc relațiile prezentate la lucrările anterioare. Pentru calculul vitezei apei se măsoară diametrul conductei și se folosește ecuația de continuitate.

Numerele Re obținute pentru tranziția de la mișcarea laminară la mișcarea turbulentă se compară cu valorile Re_{cr} preluate din literatura de specialitate.

Toate datele experimentale și valorilor calculate se înscriu într-un tabel centralizator (Tabel 12.1). Pentru fiecare experiență se face schița comportării firului de lichid colorat în conducta de sticlă.

Tabel 12.1. Calculul și analiza regimului de mișcare.

Nr. exp.	Q		v (m/s)	t (°C)	ν (m ² /s)	Re	Re_{cr}	Regim de mișcare
	(l/h)	(m ³ /s)						
1								
2								
3								
4								

LUCRAREA 13

MĂSURAREA DEBITULUI ÎN CONDUCTE SUB PRESIUNE PRIN UTILIZAREA CONTOARELOR

13.1. CONSIDERAȚII GENERALE

13.1.1. Clasificarea contoarelor

Măsurarea volumelor de apă în conducte sub presiune se poate face cu contoare de apă mecanice, având la bază principiul impulsului.

După elementul sensibil, contoarele de apă mecanice pot fi:

- cu elice;
- cu palete;
- cu elice cu anexă de sensibilizare.

Contoarele de apă mecanice (cu elice sau palete) fac parte din categoria contoarelor de viteză. Aceste contoare măsoară volumul de apă, având temperatura maximă 30°C și presiunea maximă 10 bar.

13.1.2. Contoare cu elice

Contoarele cu elice au axul elicei paralel cu axul conductei (fig. 13.1). Mecanismul înregistrator (integrator) este uscat, având dispozitivul de reglare exterior sau interior. Se execută în patru mărimi, conform tabelului 13.1:

Tabel 13.1. Caracteristicile contoarelor cu elice.

Mărimea	Diametrul racordului, (mm)	Debit caracteristic, (m ³ /h)	Debitul maxim admis		
			lunar (m ³ /h)	zilnic (m ³ /h)	de scurtă durată (m ³ /h)
50	50	30	12	15	30
100	100	140	65	85	140
150	150	350	140	175	350
200	200	600	240	300	600

Contoarele sunt compuse din: carcasă (1), capac (2), manșon (3), suportul elicei (4), lagăr (5), axul elicei (6), elice (7), șurub oglindă (8), oglindă

(9), ax de transmisie (10), melc și roată melcată (11), rama cadranelor (12), capac de protecție (13), geam de protecție (14), cadran (15), inel de îngheț (16), paharul mecanismului (17), plăci de lagăre (18), angrenajul mecanismului superior (19), presgarnitură (20), placă de centru (21), angrenajul mecanismului inferior (22), garnitură (23), mecanism de reglaj exterior sau interior (24).

Cadranul mare are cinci cadrane mici, șase ace indicatoare vopsite în roșu pentru subunități de m^3 și în negru pentru multipli de m^3 . Racordarea la conductele pe care se montează se face prin flanșe.

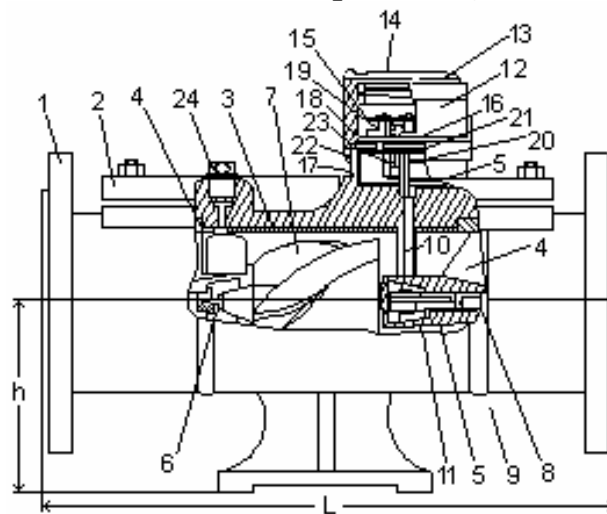


Fig. 13.1. Contorul de apă cu elice. Elemente constructive

13.1.2. Contorul de apă cu palete

Contorul cu palete (fig. 13.2) prezintă axul paletei perpendicular pe axul conductei pe care se montează. Mecanismul de integrare este uscat, având dispozitiv de reglare interior sau exterior.

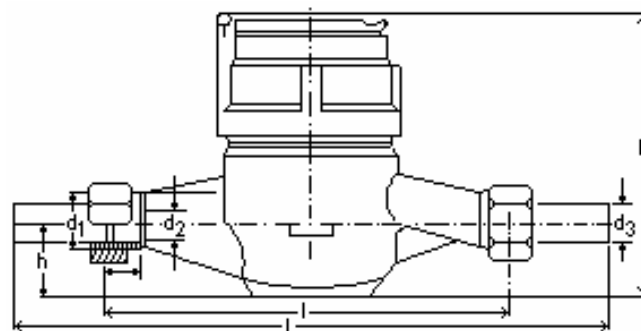


Fig. 13.2. Contor de apă cu palete

Contorul cu palete se execută în patru mărimi caracteristice, conform datelor prezentate în tabelului 13.2.

Tabel. 13.2. Caracteristicile contoarelor cu palete

Mărime	Diametrul racordului, (mm)	Debit nominal, (m ³ /h)	Debitul maxim admis		
			lunar (m ³ /h)	zilnic (m ³ /h)	de scurtă durată (m ³ /h)
13	13	3	90	6	3
15	15	3	90	6	3
20	20	5	150	10	5
30	30	10	200	20	10

Elementele componente sunt asemenea ca și la contorul cu elice. Mecanismul înregistrator poate fi cu un cadru cu ace indicatoare, fie cadru cu cifre săritoare și ac indicator central. Racordarea la conductele pe care se montează se realizează prin mufe olandeze.

13.1.3. Caracteristici hidraulice ale contoarelor de apă

a. Pierderi de presiune

Pierderea de presiune la debitul nominal al contorului cu elice este max. 1 m H₂O, iar a contorului cu palete de 10 m H₂O. În graficul din fig. 13.3 se prezintă pierderea de sarcină a contoarelor, pe abscisă fiind reprezentat debitul real sau relativ (față de cel nominal) și pe ordonat pierderile de sarcină în m H₂O:

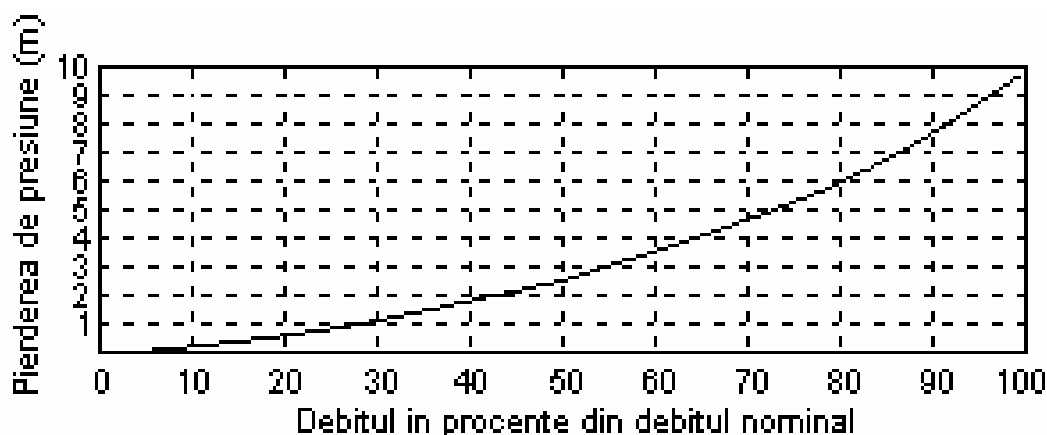


Fig. 13.3. Pierderi de presiune pe contorul cu palete (diagramă informativă)

b. Sensibilitatea

Contorul de apă trebuie să intre în funcțiune și să înregistreze în mod continuu la un debit de max. 2% din cel nominal.

c. Precizia

Eroarea tolerată a indicației contorului de apă cu palete este maxim $\pm 3\%$ pentru debite cuprinse între 2% și 5% din debitul nominal și de max. $\pm 2\%$ pentru debite între 5% și 10% din debitul nominal. Contorul cu elice are erori de $\pm 3\%$ pentru debit 5 – 10% din debitul nominal și de $\pm 2\%$ pentru debite mai mari.

Curba erorilor este reprezentată în Fig. 13.4, cu domeniul admis al erorilor.

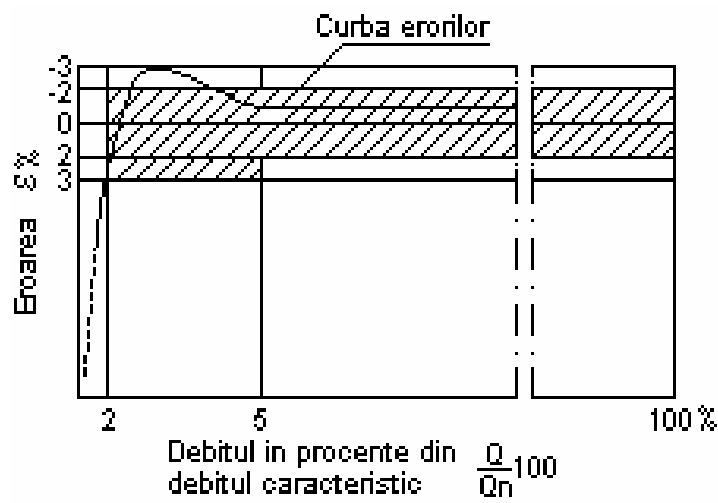


Fig. 13.4. Curba erorilor pentru contoare de apă cu elice (diagramă informativă)

13.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în cunoașterea contoarelor de apă și ridicarea caracteristicilor hidraulice ale unui contor, curba pierderilor de sarcină și a erorilor.

13.3. INSTALAȚIA DE LUCRU

Instalația experimentală se compune din următoarele elemente structurale (Fig. 13.5):

1. O conductă alimentată de la rețeaua laboratorului (1) prin intermediul unui robinet (2) și prevăzută cu o zonă de montaj a contoarelor pentru măsurarea volumelor de apă.

2. Un tronson de conductă pentru montajul contoarelor compus din: ștuț amonte (3), poziția de montaj / contor cu palet (4), ștuț aval (5), elemente de prindere.

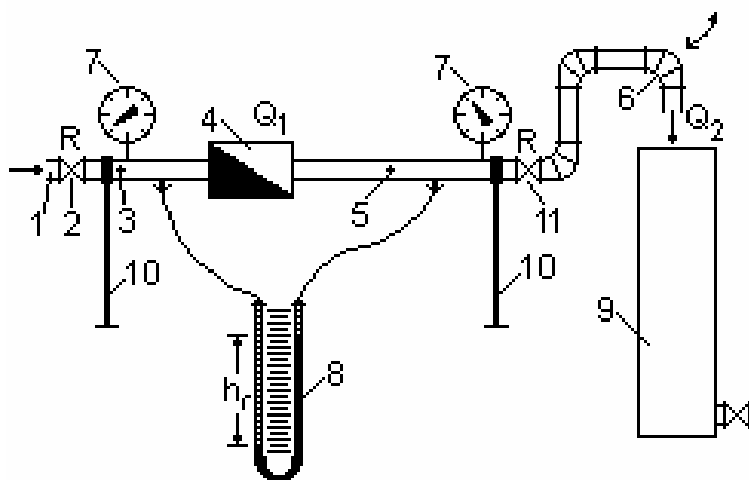


Fig. 13.5. Schema instalației experimentale

3. Robinet aval (11) pentru reglajul debitului pe conducta experimentală.

4. Instalația de măsurare a debitului compusă din următoarele: cot oscilant (6) rezervor tarat (9), suport (10).

5. Instrumente de măsură a presiunii (manometre metalice (7) în secțiuni amonte și aval pe conductă) și diferenței de presiune (manometru diferențial cu mercur (8)).

13.4. MOD DE LUCRU

Cu manometrul diferențial închis se deschide robinetul (2) la maxim. Se deschide robinetul aval (11) încet, până ce contorul pornește. Se măsoară debitul la debitul de pornire (demaraj).

La diferite debite (Q_i): 2%, 5%, 8%, 10%, 20%, 50%, 80%, 100% din debitul nominal (Q_n), care se obțin prin manevrarea robinetului (11), se fac citiri ale volumelor vehiculate.

Concomitent, se măsoară debitul volumetric cu vasul tarat (9) și un cronometru, cel puțin de două ori. Se măsoară și pierderile de sarcină, indicate de manometrul diferențial.

Înainte de efectuarea măsurătorilor în manometrul diferențial, acesta se va aerisi.

Rezultatele măsurătorilor se trec în tabelul 13.3.

13.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Rezultatele experimentale se prelucrează astfel (Tabel 13.3):

- se calculează debitul la contor $Q_c = V_1 / t_1$ și rezervor $Q_R = V_2 / t_2$;

- se calculează debitul relativ, $Q_r = \frac{Q_R}{Q_1} \cdot 100$;

- se determină erorile relative: $\delta = \frac{Q_1 - Q_R}{Q_R} \cdot 100$.

Coloanele 4 și 7 din tabelul 13.4 se reprezintă grafic și se obține curba pierderilor de sarcină.

Coloanele 4 și 5 din tabelul 13.4 se reprezintă grafic și se obține curba erorilor.

Debitul de demaraj se compară cu $2\%Q_n$.

Pe baza acestor date se caracterizează tehnic contorul și se fac recomandările pentru reglaj.

Tabel 13.3. Rezultate experimentale – calculul debitelor

Nr. crt.	Citiri la contor		V_1 (l)	t_1 (sec)	Q_c (l/s)	V_2 (l)	t_2 (sec)	Q_R (l/s)
	Iniț.	Final						
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Tabelul 13.4. Curba pierderilor de sarcină și erorilor

Nr. crt.	Q_c (l/s)	Q_R (l/s)	Q_r (%)	δ (%)	h_r	
					(mmHg)	(mca)
1	2	3	4	5	6	7
.						
n						

LUCRAREA 14

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PIERDERILOR DE SARCINĂ DISTRIBUITE (LINIARE) UNITARE ȘI A COEFICIENTULUI DE REZISTENȚĂ λ

14.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Transportul lichidelor în sistemele hidraulice se realizează cu un consum de energie hidraulică, determinat de frecarea lichidului de peretele conductei / canalului, de frecările existente în masa fluidului și de influența singularităților asupra fenomenului de curgere. Consumul de energie, numit ***pierdere de presiune Δp*** sau ***pierdere de sarcină hidraulică, h_r*** , în este pus în evidență prin relația energetică a lui Bernoulli scrisă între două secțiuni pentru un curent de lichid real (fig. 15.1):

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_r, \quad (14.1)$$

în care: v_1, v_2 sunt vitezele în cele două secțiuni; α_1, α_2 , - coeficienții Coriolis în cele două secțiuni; p_1, p_2 – presiunile în cele două secțiuni; z_1, z_2 – cotele geodezice; g – accelerația gravitațională; γ - greutatea specifică a lichidului; h_r – pierderile de sarcină între cele două secțiuni.

Pierderile de sarcină se diferențiază după modul lor de formare astfel:

- pierderi de sarcină distribuite (numite și longitudinale sau lineare), notate h_d și sunt datorate frecării fluidului de peretele solid ce delimitează curentul aflat în mișcare și de frecările dintre particulele de fluid;
- pierderi de sarcină locală sau concentrate, notate h_l , determinate de modificările în procesul de curgere date de prezența singularităților (fitinguri de îmbinare și ramificare, armături de reglare și control, aparate, dispozitive etc.).

Pierdere de sarcină totală se exprimă prin relația:

$$h_r = h_d + h_l, \quad (14.2)$$

în cazul în care pierderile de sarcină distribuite și locale se dezvoltă independent. Modul de structurare a relației de calcul pentru pierderea de sarcină totală se exprimă sub forma

$$h_r = J \cdot l, \quad (14.3), \quad \text{sau} \quad h_r = \zeta^* \frac{v^2}{2g}, \quad (14.4)$$

în care: ζ^* este coeficient de rezistență totală; l – lungimea tronsonului între secțiunile de calcul considerate; v – viteza apei în conductă sau canal; j – panta hidraulică.

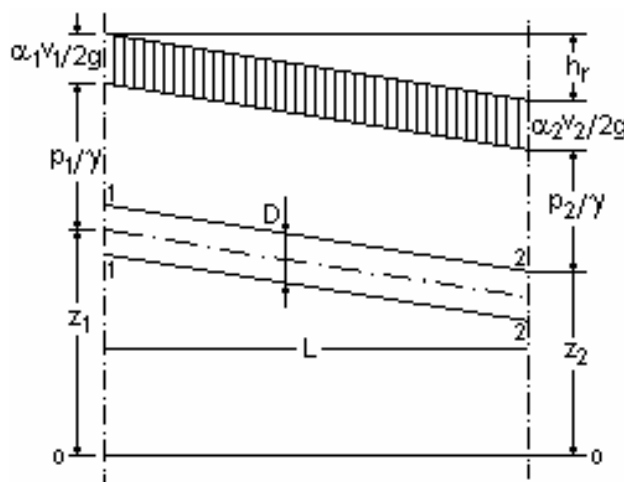


Fig. 14.1. Schema energetică a transportului lichidelor în conducte

În cazul când pe conductă nu sunt intercalate armături, pierderile de sarcină sunt datorate exclusiv frecărilor lichidului cu pereții conductei și frecărilor în interiorul conductei. În acest caz, coeficientul ζ capătă forma:

$$\zeta = \frac{\lambda \cdot l}{D}, \quad (14.5)$$

iar pierderile de sarcină distribuite se exprimă cu relația:

$$h_d = \lambda \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g}, \quad (14.6)$$

în care λ este coeficientul de rezistență liniară, numit și coeficientul Darcy – Weissbach; l – lungimea conductei între cele două secțiuni de calcul; D – diametrul conductei.

Coeficientul de rezistență liniară λ se diferențiază prin structura relației de calcul aplicabilă în cele două regimuri de curgere:

- în regimul laminar de curgere, $\lambda = f(Re)$;
- în regim turbulent de curgere, $\lambda = f\left(\frac{k}{D}, Re\right)$

unde k este rugozitate suprafeței ce vine în contact cu fluidul aflat în mișcare.

În regimul turbulent de curgere, în funcție de rugozitate și valoarea vitezei de curgere, conductele pot lucra în următoarele zone de curgere:

- zona hidraulic netedă, $\lambda = f(Re)$;
- zona de tranziție, $\lambda = f(Re, k/D)$;
- zona turbulenței rugoase sau pătratică, $\lambda = f(k/D)$.

Calculul coeficientului de rezistență liniară λ se particularizează pentru fiecare zonă a regimului turbulent. Relații de calcul sunt de tip empiric sau semiempiric. Ca mod de structurare a relațiilor de calcul se prezintă:

- pentru zona hidraulic netedă, relația Prandtl – Nikuradze:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg(Re \sqrt{\lambda}) - 0,8 \quad (14.7)$$

- pentru zona turbulentă de tranziție, relația Colebrook – White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg\left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71D}\right) \quad (14.8)$$

- pentru zona turbulenței rugoase, relația Prandtl – Nikuradze:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 + 2 \lg \frac{D}{k} \quad (14.9)$$

În calculele tehnice, ingineresti, în programe de calcul se utilizează pentru coeficientul λ relațiile tip „putere monome”, care pentru cele trei zone de curgere prezintă forma:

- zona hidraulic netedă:

$$\lambda = a Re^b; \quad (14.10)$$

- zona turbulenței de tranziție:

$$\lambda = a Re^b \left(\frac{k}{D}\right)^c; \quad (14.11)$$

- zona turbulenței rugoase:

$$\lambda = a \left(\frac{k}{D}\right)^c, \quad (14.12)$$

în care k/D este rugozitatea relativă; a , b , c – parametrii determinați prin prelucrarea datelor obținute pe cale experimentală.

Coeficientul de rezistență liniară λ se determină din măsurătorile experimentale ale pierderilor de sarcină Δh pe o lungime l de conductă cunoscută. Schema măsurătorilor experimentale este dată în fig. 14.2.

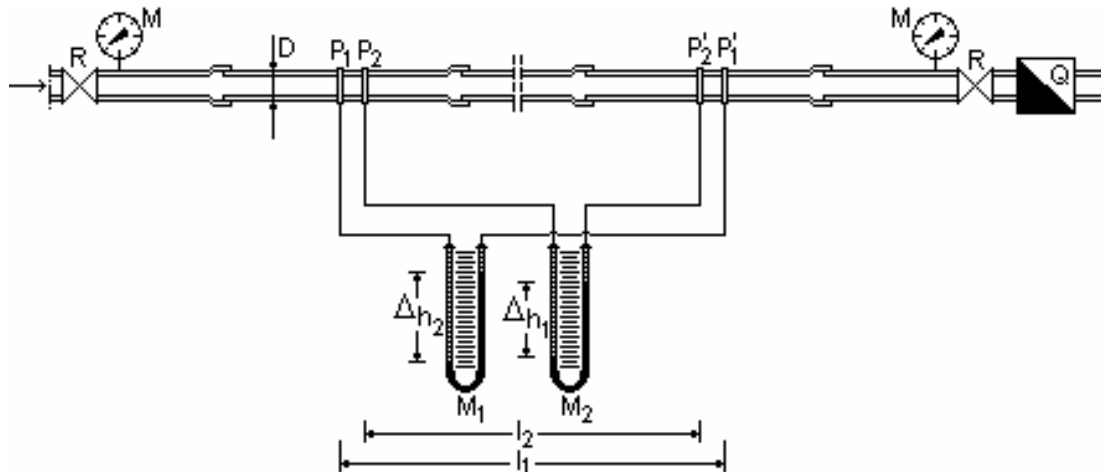


Fig. 14.2. Schema de principiu pentru determinarea pierderilor de sarcină

Conductele fiind formate din tronsoane, îmbinările produc pierderi de sarcină locale a căror influență este eliminată prin folosirea a două manometre diferențiale, montate la câte două perechi de prize de presiune P_1 ; P_1' și P_2 ; P_2' , aflate la distanțele l_1 și l_2 . Măsurătorile fiind efectuate cu două manometre diferențiale, pe două distanțe diferite, există un control permanent asupra corectitudinii măsurătorilor (eliminarea erorilor grosolane).

Raporturile:

$$J'_1 = \frac{\Delta h_1}{l_1} \text{ și } J'_2 = \frac{\Delta h_2}{l_2}, \quad (14.13)$$

reprezintă pierderile de sarcină unitare totale (liniare și locale).

Concomitent cu măsurarea pierderilor de sarcină se măsoară debitul Q în aval de tronsonul de studiu, prin utilizarea unei metode adecvate preciziei măsurătorilor.

Din diferența $\Delta h_1 - \Delta h_2$ se obțin pierderile de sarcină liniare pe distanța $l_1 - l_2$, respectiv pierderile de sarcină liniare unitare:

$$J = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{l_1 - l_2}. \quad (14.14)$$

Perechile de valori (J'_i, Q_i) și (J_i, Q_i) se reprezintă grafic în coordonate dublu logaritmice, rezultând ecuațiile de corelație a parametrilor de definesc pierderea de sarcină hidraulică totală și distribuită.

Din rezultatele experimentale primare (Q_i, J_i, D_i, t_i, k) se determină perechile de valori (λ, Re) , cu relațiile:

$$Re_i = \frac{4Q_i}{\pi D_i v_i}, \quad (14.15), \quad \lambda_i = \frac{g J_i \pi^2 D^5}{8 Q_i^2}. \quad (14.16)$$

Perechile de valori (λ, Re) se trec în tabele de calcul se prelucrează statistic și se reprezintă grafic. Prin metode specifice statisticii matematice se prelucrează perechile de valori (λ, Re) și se calculează parametrii relațiilor (14.10...14.12).

14.2. SCOPUL LUCRĂRII

Lucrarea are ca scop determinarea experimentală a pierderilor de sarcină liniare unitare J și a coeficienților a coeficienților de rezistență liniară λ . De asemenea se vor determina relațiile de calcul pentru coeficientul λ din datele obținute prin măsurători experimentale.

14.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig. 15.3) este structurată pe următoarele componente:

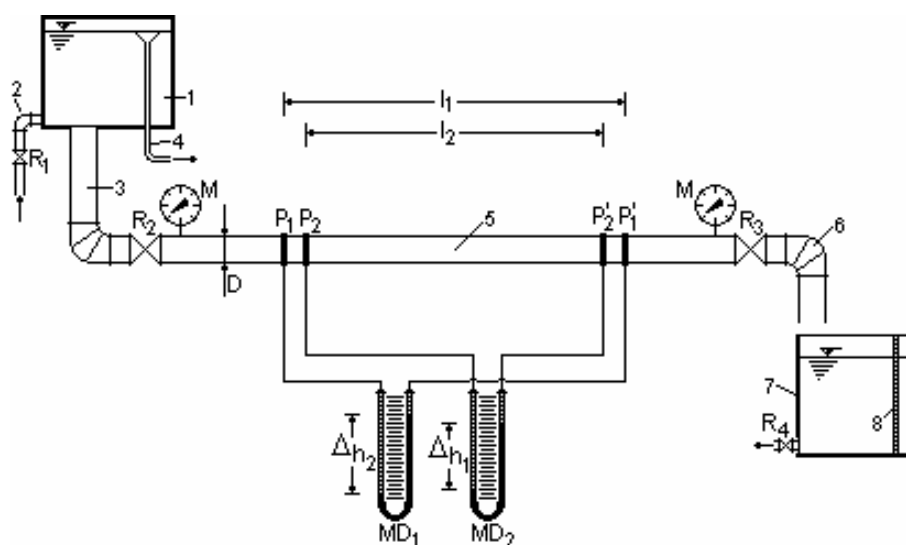


Fig. 14.3. Schema instalației experimentale din laborator

- Rezervorul de alimentare (1), care este racordat la rețeaua laboratorului de unde este alimentat prin conducta (2) și robinetul R_1 . Nivelul constant al apei în rezervor se menține prin preaplinul (4).
- O conductă de alimentare (3) a racordată la un distribuitor la care sunt racordate un număr de conducte experimentale.
- Linia de conducte experimentale (5) este formată din mai multe conducte montate în paralel racordate în amonte la un distribuitor, iar în aval la un colector. Fiecare conductă este executată dintr-un anumit material (oțel, PVC, PE, OL Zn) și cu un diametru determinat. Fiecare conductă este alimentată din distribuitor prin intermediul unui robinet (R_2). Presiunea de alimentare este controlată de manometrul M.
- Pe conducta experimentală sunt evidențiate tronsoanele de măsură (5) de lungime l_i prin dispunerea prizelor de presiune P_i .
- Conducta de evacuare a instalației racordată în amonte la colectorul liniilor experimentale, iar în aval la rețeaua laboratorului. Reglarea debitului evacuat se realizează printr-un robinet (R_3).
- Un panou dotat cu seturi de manometre pentru măsurarea diferențelor de presiune (MD_1 , MD_2),
- Instalația de măsurare prin metoda volumetrică a debitului (rezervor etalonat (7), cot oscilant (6) pe conducta de evacuare, cântar, tub de nivel (8), ștuț de golire cu robinetul R_4).

14.4. MODUL DE LUCRU

Operațiile experimentale se realizează în următoarea succesiune:

1. Se măsoară elementele geometrice ale liniei experimentale (diametrul – D , lungimile – l_1 , l_2) și se determină rugozitatea tronsonului de conductă (k).
2. Se verifică bateria de manometre (robinetele trebuie să fie închise) și se pregătește pentru efectuarea măsurărilor.
3. Se pornește instalația de alimentare a standului experimental și se deschide robinetul R_1 .
4. Se deschide robinetul de alimentare R_2 (aproape total) și cel de evacuare R_3 (cu un număr redus de rotații).
5. Se aerisește bateria de manometre și se pregătește instalația de măsură a debitului.
6. Robinetul R_3 se deschide încet până când la manometrul diferențial MD_1 se citește valoarea maximă. După stabilizarea

mișcării în tronsonul experimental se citesc diferențele de presiune Δh_1 și Δh_2 la manometrele MD₁ și MD₂ (citirea se repetă de 2...3 ori). Concomitent se măsoară volumul V de apă la vasul etalonat și timpul t corespunzător (operația se repetă de 2 ori), precum și temperatura apei.

7. Se închide robinetul R₃ cu 0,5...2 rotații, iar după stabilizarea mișcării se efectuează preluarea datelor experimentale. Operațiile se repetă până când robinetul R₃ este aproape închis. Se reiau măsurătorile pe faza de deschidere a robinetului, astfel ca valorile măsurate la manometrele diferențiale să se încadreze între cele preluate anterior. De pe standul experimental se preiau circa 15 seturi de măsurători.

8. La terminarea măsurătorilor se închid robinetele R₂ și R₃ după care se închid robinetele de la bateria de manometre.

Se reduce debitul cu ajutorul vanei R₃ și se fac din nou citirile. În mod analog se fac circa 15 determinări.

Rezultatele experimentale primare se trec în tabelul 14.2.

14.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

În prima etapă se prelucrează datele experimentale și se obțin perechile de valori (j'_i, Q_i) și (j_i, Q_i), care se reprezintă grafic în coordonate logaritmice.

În etapa a doua, din rezultatele primare (Q_i, j_i, D_i, t_i, k) și cu ecuațiile (14.15) și (14.16) se calculează perechile de valori (λ_i, Re_i) în Tabel 14.3, care apoi sunt reprezentate grafic în coordonate carteziane normale.

Pentru stabilirea zonei în care lucrează conductele se folosesc datele experimentale primare și criteriul V^* conform celor prezentate în Tabelul 14.1.

Tabel 14.1. Criteriul de stabilire a zonei de curgere

$v \cdot k / v$	Zona de lucru a conductelor
(0,5]	netedă
(5,70]	tranziție
(70, ∞)	rugosă

Viteza la perete se calculează pentru debitele extreme cu relația:

$$V_* = \frac{1}{2} \sqrt{gDj} . \quad (14.17)$$

Cunoscând astfel zona de lucru a conductei se propune pentru coeficientul λ relația adecvată dintre (14.10...14.12). Parametrii ecuației selectate se determină prin metoda celor mai mici pătrate.

Pentru relația (14.11), pătratul abaterilor punctelor (λ_i, Re_i) la curba medie propusă minimalizată este:

$$\sum (\lambda_i - \lambda_c)^2 = \sum [\lambda_i - a Re_i^b (\frac{k}{D})^c]^2 = \min . \quad (14.18)$$

Logaritmând relația (14.18), se obține abaterea:

$$AB = \sum (\lg \lambda_i - \lg a - b \lg Re_i - c \lg \frac{k}{D})^2 = \min . \quad (14.19)$$

Minimalizarea sumei se obține prin anularea derivatelor parțiale ale abaterii "AB" în raport cu parametrii $\lg a$, b , c de unde rezultă:

$$\lg a = \frac{\begin{vmatrix} \sum \lg \lambda_i & \sum \lg Re_i & N \lg \frac{k}{D} \\ \sum \lg \lambda_i \lg Re_i & \sum (\lg Re_i)^2 & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i \\ \lg \frac{k}{D} \sum \lg \lambda_i & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i & N \left(\lg \frac{k}{D} \right)^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum \lg Re_i & N \lg \frac{k}{D} \\ \sum \lg Re_i & \sum (\lg Re_i)^2 & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i \\ N \lg \frac{k}{D} & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i & N \left(\lg \frac{k}{D} \right)^2 \end{vmatrix}}$$

$$b = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum \lg \lambda_i & N \lg \frac{k}{D} \\ \sum \lg Re_i & \sum \lg \lambda_i \lg Re_i & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i \\ N \lg \frac{k}{D} & \lg \frac{k}{D} \sum \lg \lambda_i & N \left(\lg \frac{k}{D} \right)^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum \lg Re_i & N \lg \frac{k}{D} \\ \sum \lg Re_i & \sum (\lg Re_i)^2 & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i \\ N \lg \frac{k}{D} & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i & N \left(\lg \frac{k}{D} \right)^2 \end{vmatrix}}, c = \frac{\begin{vmatrix} N & \sum \lg Re_i & N \lg \lambda_i \\ \sum \lg Re_i & \sum (\lg Re_i)^2 & \sum \lg \lambda_i \lg Re_i \\ N \lg \frac{k}{D} & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i & \lg \frac{k}{D} \sum \lg \lambda_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \sum \lg Re_i & N \lg \frac{k}{D} \\ \sum \lg Re_i & \sum (\lg Re_i)^2 & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i \\ N \lg \frac{k}{D} & \lg \frac{k}{D} \sum \lg Re_i & N \left(\lg \frac{k}{D} \right)^2 \end{vmatrix}}$$

În cazul relației (14.10) din ecuațiile (14.18), (14.19) termenii ce conțin k/d se neglijează și se obțin $\lg a$ și b .

În cazul relației (14.12) din ecuațiile (14.18), (14.19) termenii ce conțin pe Re_i se neglijează și se obține $\lg a$ și c .

Relația astfel obținută de tipul (14.10...14.12) se reprezintă grafic.

Tabel 14.2. Prelucrarea datelor experimentale

Nr. crt.	V (l)	t (sec)	Q (l/s)	Δh_1 (mca)	Δh_2 (mca)	J_1 (m/m)	J_2 (m/m)	J (m/m)	t (°C)
1									
Elemente geometrice $D, l_1, l_2, k(m)$									

Tabel 14.3. Prelucrarea perechilor de valori (λ_i, Re_i)

Nr. crt.	Q (l/s)	J (m/m)	v (m ² /s)	Re	Obs.
1					

LUCRAREA 15

DETERMINAREA COEFICIENTULUI DE PIERDERE DE SARCINĂ LOCALĂ ζ LA UN ROBINET TIP SERTAR

14.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Instalațiile hidraulice sunt formate din tronsoane de conducte rectilinii legate între ele prin diverse fittinguri. De asemenea, sistemul hidraulic este dotat cu o serie de armături, care au rolul de a asigura, controla și regla parametri funcționali.

Fittingurile au rolul de îmbinare a tuburilor și tronsoanelor de conductă (mufă, niplu, piesă de conexiune etc.), de schimbare a direcției (cot, ramificație simplă dreaptă, ramificație în unghi, ramificație dublă, curbă), de schimbare a diametrului (reducții convergente sau divergente) etc.

Armăturile montate pe conducte au rolul de a închide / deschide, deriva și regla debitul (robinete), de măsură și control (debitmetre, contoare / apometre, sonde de presiune etc.), de a menține debitul și presiunea în limitele unor valori impuse (regulatoare de debit, regulatoare de presiune), de protecție (sorburi, piesă de intrare în conductă, piesă de ieșire din conductă, grătare etc.).

Variația pe distanțe scurte a secțiunii de curgere, sau a direcției axului curentului sunt puncte *singulare* pe conducte. Poziția de montaj a armăturilor constituie de asemenea, singularități ale sistemului hidraulic. În vecinătatea punctelor singulare se produc desprinderi ale stratului limită și vârtejuri, curenți secundari etc., care provoacă un consum important de energie, denumit *pierdere de sarcină locală*.

Obținerea pierderilor de sarcină locale pe cale teoretică nu se poate realiza decât în câteva cazuri simple. În general, pierderile de sarcină locală se determină pe cale experimentală.

Pierderea de sarcină locală se exprimă printr-o relație de forma:

$$h_l = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (15.1)$$

în care h_l este pierderea de sarcină locală; ζ - coeficient de pierdere de sarcină locală; v - viteza lichidului în aval de secțiunea punctului singular; g - accelerația gravitațională.

Pierderea de energie se obține prin înmulțirea relației (15.1) cu greutatea specifică:

$$\gamma h_l = \gamma \zeta \frac{v^2}{2g} \Rightarrow \Delta p = \zeta \frac{\rho v^2}{2}, \quad (15.2)$$

Coeficientul ζ depinde de caracteristicile geometrice ale elementului care produce rezistența locală (diametru, lungimi caracteristice, unghiuri, raze de curbură etc.), de rugozitatea singularității, de parametri de stare fizică a fluidului (temperatură, densitate, viscozitate), de parametri cinematici ai mișcării (viteză, accelerație), de numărul Re etc.

Dependența coeficientului ζ de numărul Re este mai apropiată la numere mici. La numere Re mari (mai mari decât valoarea critică) această dependență este din ce în ce mai scăzută, până când ζ nu mai depinde de Re .

Pierderea locală de sarcină se poate exprima în pierdere de sarcină liniară echivalentă l_e pe o anumită lungime de conductă, conform relației:

$$l_e = \frac{\zeta D}{\lambda}. \quad (15.3)$$

Armăturile de pe o instalație se influențează reciproc, dacă sunt la distanță mai mică de $l = 30D$. În acest caz, pierderile de sarcină locală nu sunt aditive ($h_{l,t} \neq h_{l,1} + h_{l,2}$), ci necesită un factor de corecție:

$$h_{l,t} = C(h_{l,1} + h_{l,2}). \quad (15.4)$$

Pentru determinarea experimentală a pierderilor de sarcină locale, standardele în vigoare recomandă amplasarea prizelor de presiune în amonte de armătură cu minimum $5D$ și în aval cu minimum $10D$.

Determinarea experimentală a pierderilor de sarcină locală pentru o singularitate oarecare se realizează conform schemei prezentată în Fig. 15.1. Operațiile experimentale sunt următoarele:

- a - măsurarea pierderilor de sarcină totale, $\Delta h = h_r$, la manometrul diferențial (6), pe distanța $l_1 + l_2$, cuprinsă între prizele de presiune $P_1; P_1'$;
- b - măsurarea debitului la debitmetrul (2);
- c - repetarea măsurătorilor pentru diverse grade de deschidere a robinetelor 3 și 3';

d - din pierderile de sarcină totale h_r se scad cele liniare h_d și se obțin pierderile de sarcină locală:

$$h_l = h_r - h_d ; \quad (15.5)$$

e - din relația (14.1) se obține coeficientul de rezistență locală ζ în situația cunoașterii debitului, diametrului, pierderilor de sarcină locală:

$$\zeta = \frac{g\pi^2 D^4 h_l}{8Q^2} ; \quad (15.6)$$

f - coeficientul de rezistență locală ζ poate fi exprimat printr-o relație în funcție de elementele geometrice caracteristice ale singularității, de Q , sau Re etc.

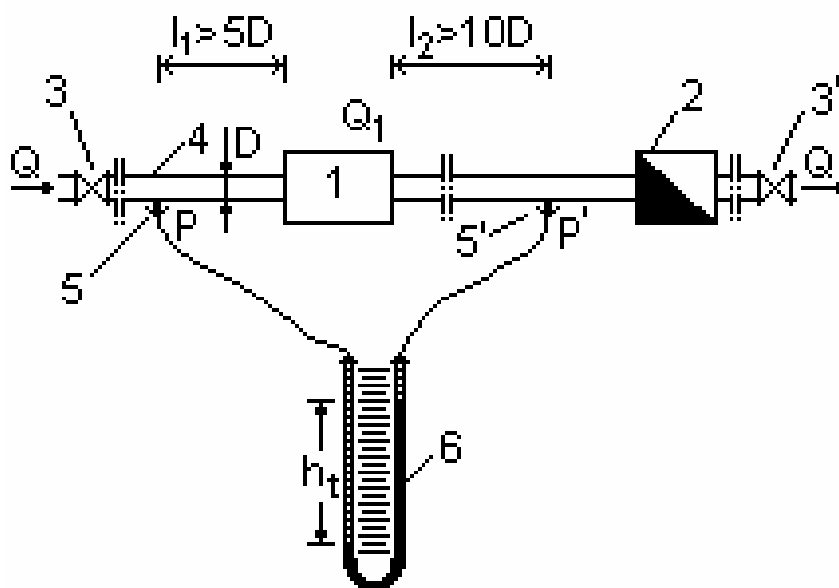


Fig. 15.1. Schema determinării experimentale a coeficientului de rezistență locală ζ :

- 1 – rezistență locală; 2 - debitmetru; 3, 3' – robinet amonte, respectiv aval;
4 - tronson de conductă; 5, 5' - prize de presiune; 6 - manometru diferențial

15.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării constă în determinarea în laborator a coeficientului de rezistență locală ζ la un robinet tip sertar.

De asemenea, se va întocmi corelația dintre gradul de deschidere a robinetului și valoarea coeficientului de rezistență locală ζ .

15.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală este structurată pe următoarele elemente componente (fig. 15.2):

1. Alimentarea de la rețeaua laboratorului prin intermediul robinetului R_1 . Evacuarea apei din instalație se face cu ajutorul robinetului R_5 .

2. O conductă de o anumită lungime și cu caracteristicile geometrice (diametru - D , lungimi - l_1) și ale materialului de execuție (rugozitate k) cunoscute sau măsurabile. Pe conductă, în amonte și aval, sunt montate două manometre, M_1 și M_2 pentru controlul și măsurarea presiunilor.

3. Robinetul (R) supus experimentului este montat pe un tronson de conductă conform normelor pentru studiul hidraulic al pierderilor de sarcină.

4. Debitul se măsoară la un instrument adecvat (venturimetrul V), sau prin metoda volumetrică folosind un vas etalonat (VE).

5. Reglarea debitului se realizează cu robinetul aval R_5 .

6. Pierderile de sarcină pe instalația experimentală și la robinetul testat se măsoară cu un manometre diferențiale M_R , racordate la prizele de presiune.

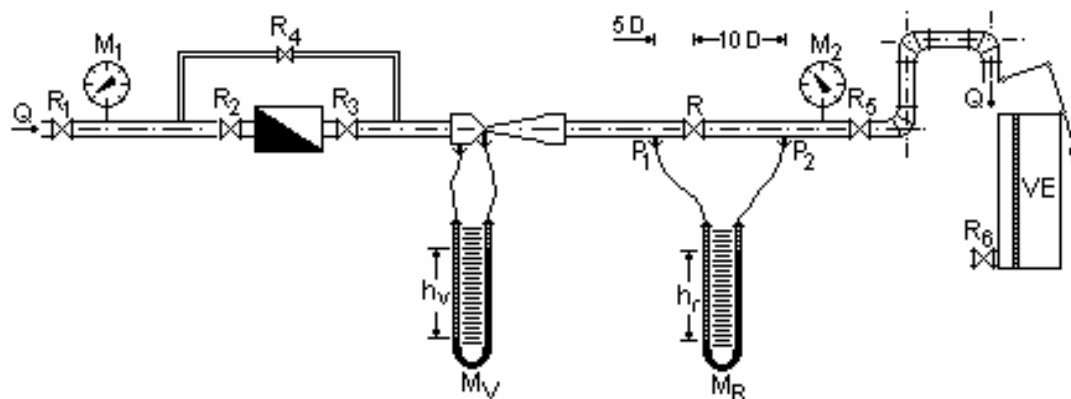


Fig. 15.2. Instalația experimentală din laborator pentru determinarea pierderilor de sarcină locală la o vană sertar

Elementele geometric și funcționale caracteristice ale robinetului cu sertar considerat în studiul experimental sunt redată în Fig. 14.3.

Sertarul robinetului vanei este acționat de axul de manevrare filetat, antrenat de roata de manevră. Ridicarea totală a sertarului are loc la N rotații, respectiv:

$$N \cdot t = D, \quad (15.7)$$

în care N este numărul total de rotații ale axului; t – pasul filetului; D – diametrul conductei.

Deschiderea e a robinetului este proporțională cu numărul de rotații n și cu pasul filetului definită prin relația:

$$e = n \cdot t. \quad (15.8)$$

Raportul e/D , de care depind coeficientul ζ și pierderile de sarcină este:

$$\frac{e}{D} = \frac{n}{N}. \quad (15.9)$$

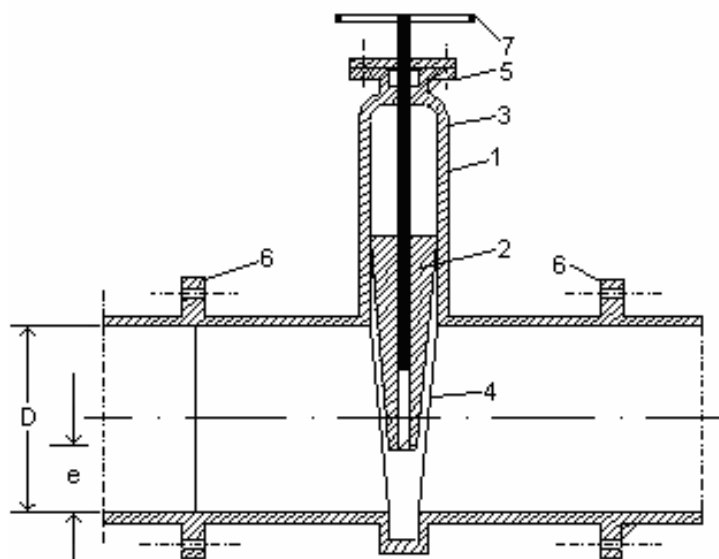


Fig. 15.3. Elementele geometrice și funcționale ale robinetului tip sertar:
1 - corpul robinetului; 2 - sertarul; 3 - ax de manevrare; 4 - ghidaje;
5 - presetupă; 6 - flanșe de legătură; 7 - roată de manevrare.

Numărul de rotații n se socotește de la poziția complet închis la deschiderea dorită.

15.4. MODUL DE LUCRU

Operațiile experimentale sunt următoarele:

1. Se măsoară parametri geometrici ai instalației (diametre, lungimile l_1 și l_2) și se determină numărul de rotații N ale axului de antrenare a robinetului (R) pentru deschiderea maximă pornind de la poziția închis. Se închide din nou robinetul R. Se pregătește bateria de manometre pentru măsurarea diferențelor de presiune.
2. Instalația experimentală se pune sub presiune prin alimentarea de la rețeaua de conducte a laboratorului (Fig. 15.2). Toate robinetele instalației sunt închise.

3. Se deschid robinetele R_1 și R_4 , astfel ca presiunea să nu depășească valoarea 5 bar măsurată la manometrul M_1 .
4. Se deschide robinetul R cu gradul de deschidere $e = 0,10 D$, după care se deschide robinetul R_5 astfel ca manometrul M_R să fie denivelat la maxim.
5. Se efectuează citirea diferențelor de presiune la manometrele M_v și M_r . Concomitent cu această operație se determină debitul prin metoda volumetrică la vasul etalonat.
6. Se modifică gradul de deschidere a robinetului R la $e = 0,20 D$ și se închide robinetul R_5 , până ce la manometrul M_v se citește aceeași valoare ca în cazul precedent (debitul se păstrează la o valoare aproximativ constantă). Se refac din nou măsurătorile.
7. Se repetă măsurătorile pentru următoarele grade de deschidere a robinetului R, până ce se obține deschiderea maximă. Valorile preluate de pe instalația experimentală se trec în tabelul 15.1.
8. La terminarea experiențelor se închide robinetul de alimentare a instalației și robinetele manometrele de măsură a diferențelor de presiune.

15.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Datele colectate de pe instalația experimentală se prelucurează în modul următor:

- se transformă diferențele de presiune din u.m. mmHg în mca;
- se calculează parametri l_1 (distanța de la priza de presiune P_1 la robinetul R) și l_2 (distanța de la robinetul R la priza de presiune P_2); se calculează coeficientul de rezistență distribuită (liniară) λ folosind relația $\lambda = 0,021 D^{-0,3}$;
- se calculează debitul prin metoda volumetrică și viteza prin utilizarea ecuației de continuitate;
- din relația (15.5) în funcție de valoarea pierderilor de sarcină totală, a celor distribuite, vitezei, coeficientului de rezistență distribuită se calculează pierderile de sarcină locală:

$$h_l = h_t - \lambda \frac{l_1 + l_2}{D} \frac{v^2}{2g};$$

- cu relația (15.6) se calculează coeficientul de rezistență locală ζ ;

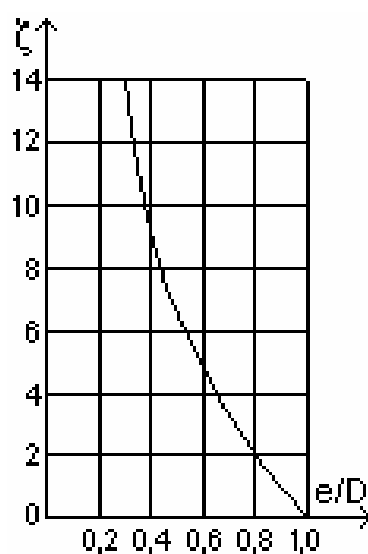
- se calculează numărul Re corespunzător;
- rezultatele se centralizează în tabelul 14.2; perechile de valori (e/D , ζ) se reprezintă grafic într-un sistem de coordonate carteziene (Fig. 15.4).

Tabel 15.1. Date experimentale preluate de pe stand

Nr. crt.	n	$e/D=n/N$	h_t		h_v	V	t	Q
			(mmHg)	(mca)	(mmHg)	(l)	(s)	(l/s)

Tabel 15.2. Prelucrarea datelor experimentale

Nr. crt.	e/D	Q (l/s)	v (m/s)	h_t (mca)	h_l (mca)	Re	ζ	Obs.

Fig. 15.4. Variația coeficientului ζ în funcție de gradul de deschidere la un robinet tip sertar

LUCRAREA 16

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR HIDRAULICE ALE CONDUCTELOR SCURTE

16.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Sistemele sub presiune sunt instalații hidraulice în care lichidul are o mișcare sub presiune.

Sistemele de conducte sub presiune sunt sisteme lungi și scurte.

Problemele sistemelor hidraulice se rezolvă prin folosirea unor relații de calcul, dintre care un loc important are ecuația lui Bernoulli sub forma generală, conform fig. 16.1:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_r. \quad (16.1)$$

La sisteme de conducte lungi se poate neglija diferența termenilor cinetici, iar pierderile de sarcină locală pot fi înglobate în cele liniare, sub formă procentuală. Un sistem se poate considera lung dacă, prin aproximațiile enunțate, în calcule nu se introduc erori mai mari de 2%.

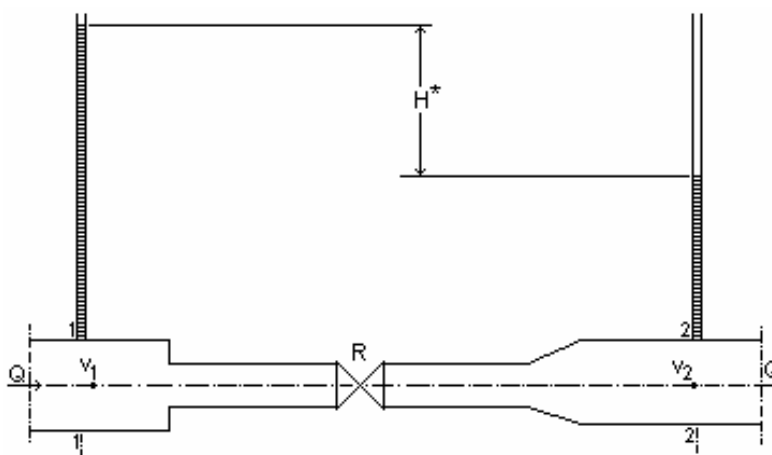


Fig. 16.1. Sistem de conductă sub presiune

La sisteme de conducte scurte, toți termenii din ecuația lui Bernoulli trebuie luați în considerare, altfel, în calcule, se introduc erori inadmisibil de mari.

Înlocuind în ecuația (16.1) pierderile de sarcină după relația generală, v_1 funcție de v_2 (din ecuația de continuitate), se obține:

$$H^* = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right) = \left[\alpha_2 - \alpha_1 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \zeta^*\right] - \frac{v_2^2}{2g}. \quad (16.2)$$

Notând: $v_2 = v$, se obține:

$$v = \varphi \sqrt{2gH^*}, \quad (16.3)$$

în care:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 - \alpha_1 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 + \zeta^*}} \quad (16.4)$$

cu: ζ^* - coeficienții de pierdere de sarcină a sistemului redus.

În practica inginerescă hidrotehnică se folosesc frecvent sisteme de conducte scurte sau conducte scurte precum: podețe sub presiune, goliri de fund, sifoane, urcătoare sau coborătoare etc.

Un caz particular al conductelor scurte este sifonul urcător (fig. 16.2).

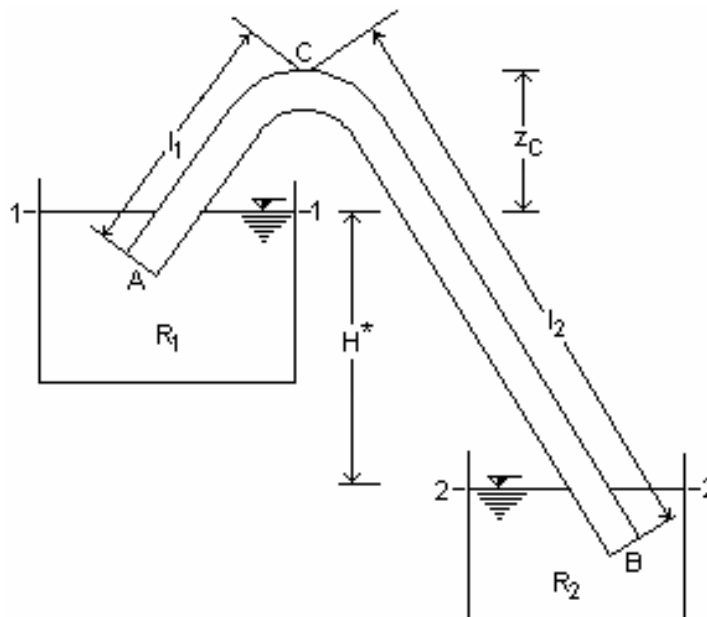


Fig. 16.2. Sifon urcător

Sifonul urcător transportă un debit Q din rezervorul 1 în rezervorul 2, sub sarcină totală H^* . În ramura urcătoare a sifonului presiunea este mai mică decât cea atmosferică, iar presiunea vacuumetrică maximă se obține în punctul C. Sifonul poate funcționa atât timp cât în punctul C presiunea este mai mare decât presiunea de vaporizare. Presiunea vacuumetrică în punctul C se determină din ecuația lui Bernoulli aplicată în secțiunile: nivelul liber în rezervorul 1 și punctul C:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_c + \frac{p_c}{\gamma} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_r. \quad (16.5)$$

Considerând: $z_1 = 0$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$; $v_1 = 0$, $p_1 = p_{at}$, iar $h_r = (\lambda \frac{l_1}{D} + \sum \zeta) \frac{v_2^2}{2g}$,

ecuația (16.5) devine:

$$\frac{p_c - p_{at}}{\gamma} = -\left\{ z_c + [\alpha + (\frac{\lambda l}{D} + \sum \zeta)] \frac{v_2^2}{2g} \right\}. \quad (16.6)$$

16.2. SCOPUL LUCRĂRII

Lucrarea are drept scop determinarea experimentală a coeficientului ζ și a presiunii vacuumetrice din punctul C al unui sifon urcător și compararea acestor valori cu cele teoretice.

16.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig. 16.3) se compune din rezervorul (1), cu preaplin (5), alimentat de la rețeaua laboratorului (10), din care curge apa în rezervorul (2) prin sifonul (4).

Evacuarea apei se face printr-un cot oscilant (9) în conducte de evacuare (6) sau în rezervorul etalonat pentru măsurarea debitelor (3). Nivelul apei în rezervoare se determină cu tuburi piezometrice (11). Evacuarea apei din rezervoare este posibilă prin robineții (7) și (8). Presiunea vacuumetrică din punctul C al sifonului se măsoară cu un vacuumetru cu tub U (12).

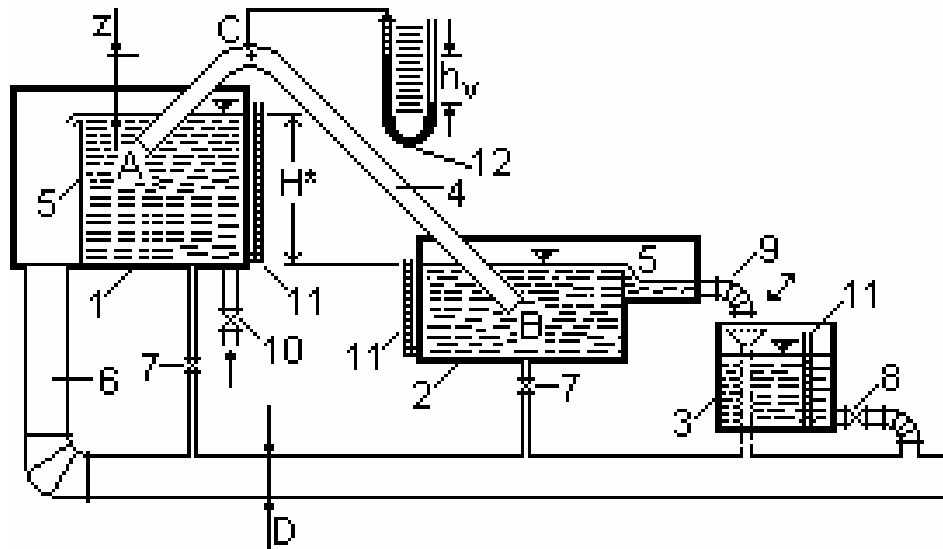


Fig. 16.3. Instalația experimentală pentru studiul sifonului urcător

16.4. MODUL DE LUCRU

Se măsoară elementele geometrice ale sifonului.

Se fixează sifonul, care se experimentează în poziție, între rezervoarele (1) și (2). Se deschide robinetul (10) de alimentare și se umple rezervorul (1) până ce preaplinul funcționează, apoi se amorsează sifonul. După stabilizarea nivelurilor în rezervoarele (1) și (2) se măsoară sarcina H^* , la tuburile piezometrice (11), debitul, cu rezervorul etalonat, presiunea vacuometrică în punctul C, cu vacuumetrul (12) și cota z .

Măsurătorile se efectuează pentru 3-4 valori diferite ale sarcinii H^* , modificările fiind făcute prin poziția preaplinului (5). Fiecare element măsurat trebuie să fie media a cel puțin 3 citiri la instrumentele de măsurat.

16.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Din ecuația de continuitate se determină viteza de curgere a apei în sifon, având măsurate elementele geometrice ale sifonului și debitul:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (16.7)$$

Din ecuația (3) se determină φ :

$$\varphi = \frac{v}{\sqrt{2gH^*}} \quad (16.8)$$

care se compară cu φ_t teoretic:

$$\varphi_t = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l_1 + l_2}{D} + \sum \zeta}}, \quad (16.9)$$

în care:

λ este coeficientul lui Darcy;

$l_1 + l_2$ - lungimea sifonului;

D – diametrul sifonului;

$\sum \zeta$ - suma coeficienților de pierdere de sarcină locală (la intrare, la cot, la ieșire).

Presiunea vacuumetrică măsurată se compară cu cea teoretică, rezultată din relația (16.6). Rezultatele se trec în tabelul 16.1.

Tabel 16.1. Rezultate experimentale

[illegible]

LUCRAREA 17

**CURGEREA LICHIDELOR PRIN ORIFICII ȘI AJUTAJE.
DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ
A COEFICIENȚILOR DE VITEZĂ φ ,
DE CONTRACȚIE ξ ȘI DE DEBIT μ**

17.1. CONSIDERAȚII GENERALE

a. Orificii

Prin orificiu (fig. 17.1) se înțelege o deschidere practică în peretele unui rezervor prin care lichidul iese și formează o vână de fluid. Orificiul mic în perete subțire este o deschidere pentru care înălțimea este 1/10 din sarcina de curgere iar vana lichidă este în contact numai cu muchia interioară a deschiderii. Orificiile pot fi: *mici, mari, cu perete subțire, cu perete gros, în perete vertical, în perete orizontal, cu curgere liberă, cu curgere înecată.*

Din spectrul curgerii se constată că liniile de curent din rezervor converg spre centrul orificiului iar la ieșire se formează o vână lichidă neînecată care datorită tensiunii superficiale se menține pe o distanță destul de mare. Alura vânei se apropie de o parabolă. La o distanță δ de circa $d/2$ față de planul secțiunii orificiului, vâna de lichid suferă o contracție cu secțiunea A_c , explicabilă prin convergența liniilor de curent din rezervor. Raportul secțiunii orificiului A și secțiunii contractate A_c se numește *coeficient de contracție* ε ,

$$\varepsilon = \frac{A_c}{A}. \quad (17.1)$$

Viteza de curgere prin orificiu se determină din ecuația lui Bernoulli între secțiunile 0-0 și 1-1:

$$\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} + \frac{P_0}{\gamma} + H = \frac{\alpha v^2}{2g} = \frac{P}{\gamma} + \varphi \frac{v^2}{2g}, \quad (17.2)$$

$\frac{P_0}{\gamma} = \frac{P}{\gamma}$ fiind presiunea atmosferică, $v_0 = 0$ și $\alpha_0 = \alpha_1 = \alpha$, iar φ este coeficientul de rezistență locală la orificiu.

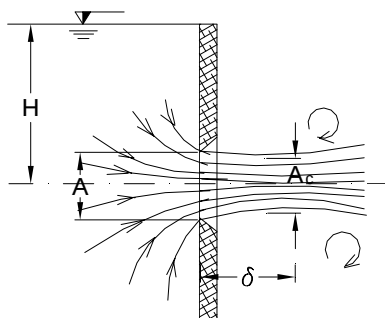


Fig. 17.1. Orificiu mic în perete subțire

Astfel ecuația (17. 2) devine:

$$H = \frac{v^2}{2g}(\alpha + \xi), \quad (17. 3)$$

sau:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} \sqrt{2gH}. \quad (17. 4)$$

Expresia $\frac{1}{\sqrt{\alpha + \xi}} = \varphi$ definește coeficientul de viteză, iar ecuația (17. 4) se transformă în:

$$v = \varphi \sqrt{2gH}. \quad (17. 5)$$

Debitul orificiului se obține din ecuația de continuitate:

$$Q = A_c v = \varphi \cdot A_c \sqrt{2g \cdot H} = \varphi \cdot \varepsilon \cdot A \sqrt{2g \cdot H} = \mu A \sqrt{2g \cdot H}, \quad (17. 6)$$

unde μ este coeficientul de debit.

Traectoria vânei de lichid se obține din ecuațiile parametrice ale mișcării scrise față de axele x, y :

$$\begin{cases} x = vt \\ y = \frac{gt^2}{2} \end{cases} \quad (17.7)$$

Prin eliminarea timpului se obține:

$$y = \frac{x^2}{4 \cdot \varphi^2 \cdot H}, \quad (17.8)$$

deci traectoria vanei lichide este o parabolă de gradul 2.

b. Ajutaje

Ajutajele (fig. 17.2) sunt piese de formă oarecare (tuburi cilindrice, drepte, conice-convergente-divergente sau de formă specială), care se atașează orificiilor, interior sau exterior, pentru modificarea caracteristicilor curgerii.

Când lungimea lor este cuprinsă între (3...5) d coeficientul de debit crește față de coeficientul de debit al orificiilor. Ecuațiile care caracterizează mișcarea sunt analogice orificiilor cu specificația:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \sum \xi}}. \quad (17.9)$$

Ajutajele adăugate orificiilor măresc debitul. Acest fapt se explică prin faptul că sarcina efectivă sub care se produce curgerea în secțiunea contractată este mai mare decât sarcina orificiului: $H' = H + \frac{p}{\gamma}$, unde p este presiunea în secțiunea contractată și este mai mică decât cea atmosferică.

Coeficientul de debit al orificiilor depinde de mărimea orificiului, viteza de acces, forma muchiei, rugozitatea peretelui în preajma orificiului, vâscozitatea lichidului, felul contracției și de condițiile de curgere.

La ajutaje, în plus față de orificii, coeficientul de debit este influențat de tipul ajutajului. Coeficienții orificiilor și ajutajelor sunt reprezentați comparativ în tabelul 17.1.

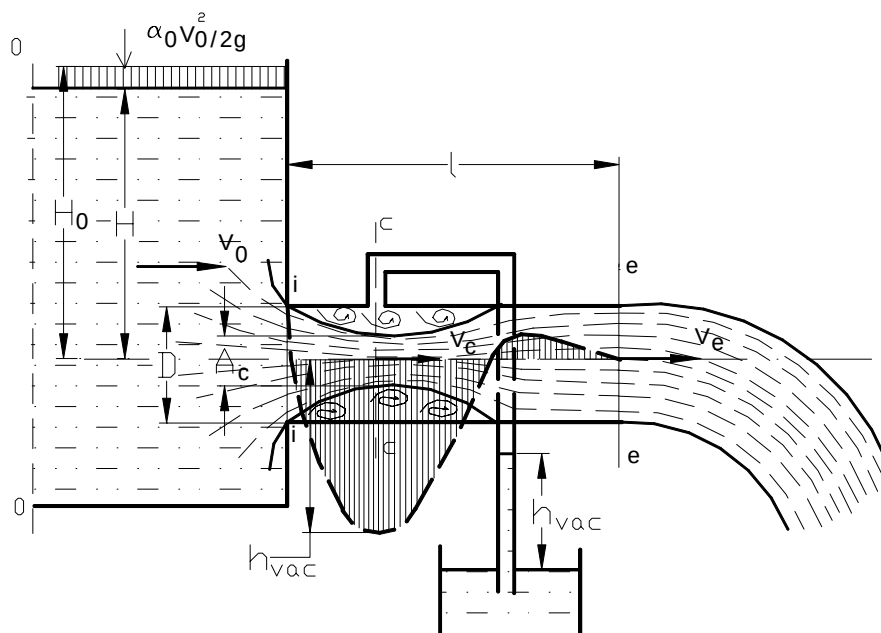


Fig. 17.2. Ajutaj cilindric exterior

Tabel 17.1

Nr. crt.	Tipul orificiului sau ajutorului	ε	φ	μ
1.	Orificiul mic în perete subțire	0,64	0,98	0,62
2.	Ajutaj cilindric exterior	1,0	0,82	0,82
3.	Ajutaj cilindric interior (Borda)	1,0	0,71	0,71
4.	Ajutaj conic convergent $\theta = 13^\circ$	0,98	0,963	0,946
5.	Ajutaj conic divergent $\theta = 8^\circ$	1,0	0,45	0,45
6.	Ajutaj conoidal	1,0	0,97	0,97

17.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este determinarea experimentală a coeficienților ε , φ , μ la orificii mici și diverse tipuri de ajutaje (cilindric exterior, cilindric interior, conic convergent – duza de aspersor).

17.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig. 17.3) se compune din: două rezervoare, rezervor de alimentare (RA) cu preaplin și rezervor de înecare (RI); conducta de alimentare CA cu robinetul R_1 ; conducta de evacuare CE, cu legătură la rezervorul de alimentare prin robinetul R_5 și rezervorul de înecare prin robinetul R_6 ; nivelul în cele două rezervoare se măsoară la tuburile piezometrice (TP); în peretele rezervorului (RA) se montează la găurile filetate orificiile și ajutajele care se studiază. Un ajutaj cilindric este prevăzut cu priză de presiune, în secțiunea contractată, legată la un vacumetru. Nivelul în rezervorul de înecare se reglează cu robinetii R_2 , R_3 , R_4 care evacuează apa în conducta de evacuare.

Debitul se măsoară volumetric cu cilindru gradat pe colectorul (C) iar coordonatele vanei lichide cu rigle culisante.

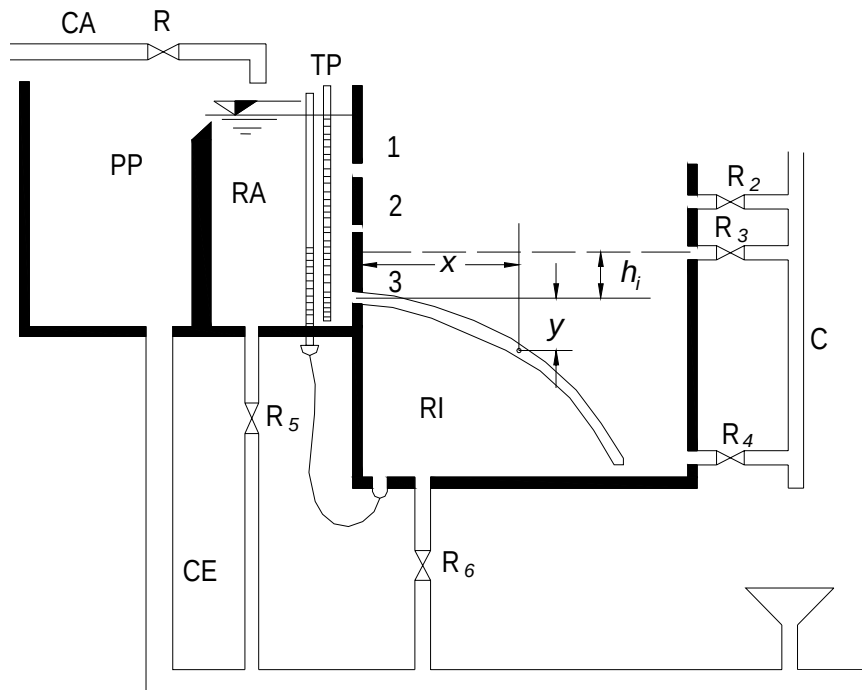


Fig. 17.3. Instalația experimentală

17.4. MODUL DE LUCRU

Experiențele se desfășoară diferențiat pentru orificii neîmecate și îmecate.

a. Pentru orificii neîmecate se procedează astfel:

- se montează orificiul pe poziția (1) celelalte poziții fiind închise;
- se umple rezervorul cu apă, deschizând robinetul R_1 până ce preaplinul intră în funcțiune și se deschide robinetul R_4 ;
- se măsoară sarcina pe orificiu, la tubul piezometric (TP), debitul descărcat de colectorul (C) și traiectoria vanei lichide (x , y) în trei puncte, rezultatele trecându-se în tabelul 18.2 (coordonatele traiectoriei vanei de lichid se măsoară spre capătul aval al acestuia);
- se repetă operația pentru poziția 2 și 3 a orificiului.

b. Pentru orificiu îmecat se procedează astfel:

- cu orificiul aflat în poziția 3 se închide R_4 ;
- după umplerea rezervorului de îmecare până la robinetul R_3 , se măsoară debitul la colectorul C, sarcina sub care se face curgerea și adâncimea de îmecare, la tuburile piezometrice (TP);

- experiența se repetă pentru poziția robinetului R_3 închis și R_2 deschis;
- rezultatele se centralizează în tabelul 17.3.

c. Pentru ajutaje neîmecate sau îmecate se procedează astfel:

- se montează un ajutoraj pe poziția 3 și după stabilizarea mișcării se determină debitul descărcat de robinetul R_4 și sarcina pe ajutoraj precum și vacuumul din secțiunea contractată;
- analog cu punctul b. se fac determinările pentru ajutoraj îmecat;
- prin montarea la poziția (3) a ajutorajului cilindric exterior, cilindric interior și conic convergent se vor determina parametrii acestora;
- datele experimentale se centralizează în tabelul 17.4.

17.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

a. pentru orificiul mic în perete subțire neîmecat fiind măsurate H , Q , d , x , y se determină următoarele:

- coeficientul de viteză din ecuația (17.8) are expresia:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{yH}}; \quad (17.9)$$

- coeficientul de debit din ecuația (17.6) are expresia:

$$\mu = \frac{Q}{A\sqrt{2gH}}; \quad (17.10)$$

- coeficientul de contracție:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\varphi}. \quad (17.11)$$

Rezultatele se prelucrează statistic.

b. Pentru orificii mici îmecate se determină coeficientul de debit din ecuația (17.10).

c. Pentru ajutoraje se determină coeficienții de debit conform ecuației (17.10).

Rezultatele experimentale se compară cu valorile date în tabelul 17.1.

Tabel 17.2. Rezultate experimentale la orificiul neînecat

Poziția orificiului	H (mCA)	Q (m ³ /s)	μ	x	y	φ	φ_m	ε	Caracteristici geometrice (d - mm)	Obs.
1										
2										
3										

Tabel 17.3. Rezultate experimentale la orificiul înecat

Nr. crt.	H (mCA)	h_i (mCA)	Q (m ³ /s)	μ	Observații
1					
2					

Tabel 17.4. Rezultate experimentale la ajutaje

Nr. crt.	Tip ajutor	Caracteristici generale	H	H_i	h_v	μ	Observații
1	Cilindric Exterior Neînecat			--			
2	Cilindric Exterior Înecat						
3	Cilindric Interior Neînecat			--			
4	Conic Exterior Neînecat (duza asp.)			--			

LUCRAREA 18

CURGEREA LICHIDELOR PRIN ORIFICII MARI. FOLOSIREA ORIFICIILOR MARI DE STAVILĂ CA DEBITMETRE

18.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Se definesc ca *orificii mari* acele orificii la care raportul înălțimii acestora și sarcina pe orificiu este mai mare de 1/10.

Debitul orificiului se calculează considerând orificiul mare ca fiind format din juxtapunerea unei infinități de orificii elementare, la care debitul este:

$$q = \mu \cdot l \sqrt{2g \cdot h} \cdot d \cdot h. \quad (18.1)$$

Integrând relațiile în limitele h_1 ; h_2 considerând $l = b = \text{const}$ (fig. 18.1) se obține:

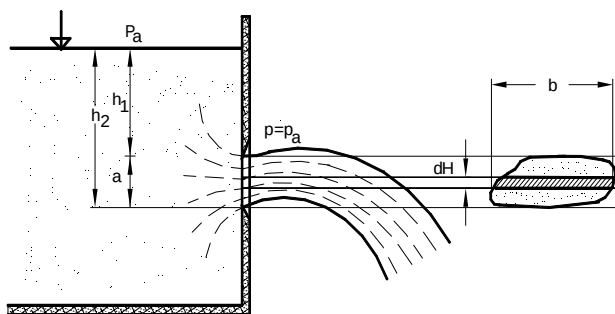


Fig. 18.1 Schema de calcul a unui orificiu mare

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (h_2^{3/2} - h_1^{3/2}). \quad (18.2)$$

Se obișnuiește să se calculeze debitul orificiilor mari cu relația orificiilor mici, sarcina orificiului fiind considerată de la nivelul liber al apei, până la centrul de greutate a orificiului:

$$Q = \mu A \sqrt{2gH_0} = \mu b a \sqrt{2gH}. \quad (18.3)$$

Debitul specific q este:

$$q = \mu a \sqrt{2gH} . \quad (18.4)$$

Dacă orificiul este practicat la fundul vasului sau pe colț apare fenomenul de contracție parțială.

Dacă orificiul este format din deschiderea vanei pe un canal atunci orificiul este *de fund cu contracție parțială* și, la determinarea sarcinii pe orificiu, trebuie ținut seama și de viteza de apropiere (fig. 18.2).

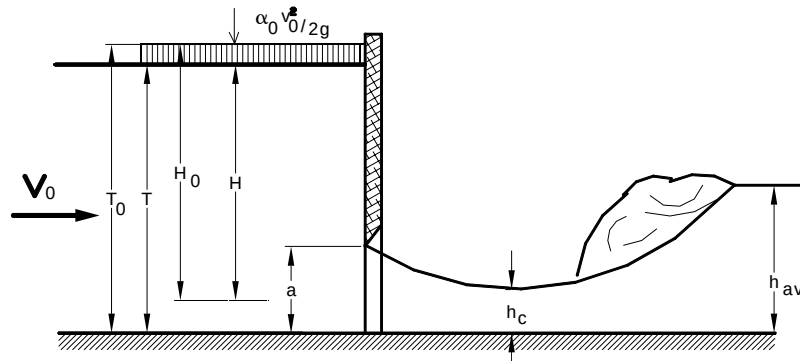


Fig. 18.2. Schema orificiului de vană

În acest caz debitul se calculează cu relația:

$$q = \mu a \sqrt{2g(T_0 - \varepsilon \cdot a)} , \quad (18.5)$$

în care: q este debitul specific;

μ - coeficient de debit;

a - deschiderea stăvilarului;

T_0 - sarcina totală în canale;

ε - coeficient de contracție pe verticală, $\varepsilon = \frac{h_c}{a}$.

Mărimea coeficientului de contracție (ε) depinde de deschiderea relativă a stavilei (a/T) și este prezentată în tabelul 18.1:

Tabel 18.1. Valorile coeficientului ε și μ la orificii de vană

a/T	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35
ε	0,615	0,617	0,619	0,622	0,625	0,629
μ	0,611	0,612	0,613	0,614	0,615	0,616
a/T	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
ε	0,633	0,639	0,645	0,652	0,661	0,675
μ	0,617	0,619	0,621	0,623	0,625	0,628

În cazul curgerii înecate debitul este:

$$q = \mu a \sqrt{2gz} . \quad (18.6)$$

18.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării îl constituie determinarea experimentală a coeficientului de debit μ și coeficientul de contracție ε și compararea acestora cu datele din literatură. Cu valorile obținute se vor trasa grafic variația debitului cu deschiderea stăvilii și sarcina de curgere (cheia debitelor la un stăvilar).

18.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pe canalul vitrat (1) al Laboratorului este montată o stavilă (2) cu deschiderea "a". Alimentarea canalului se face de la rețeaua laboratorului prin vana R iar debitul vehiculat se măsoară cu deversorul triunghiular (3). Adâncimea apei amonte și aval de stăvilar se măsoară cu ace de măsurare (4).

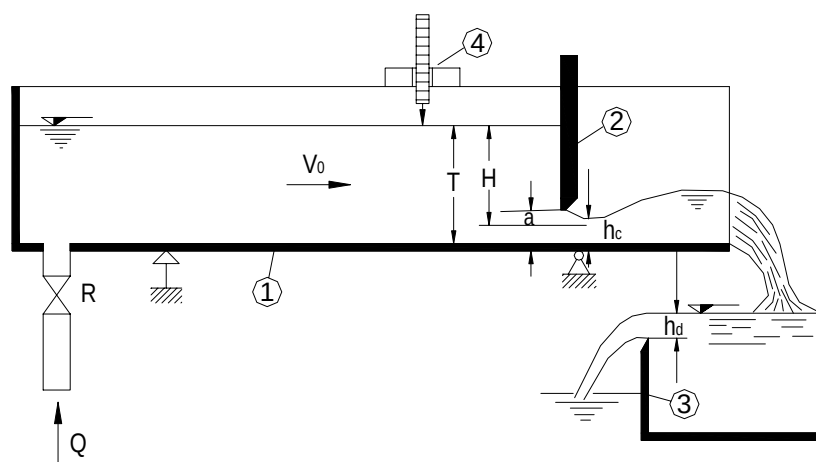


Fig. 18.3. Schema instalației experimentale

18.4. MODUL DE LUCRU

Pe canalul fără apă se măsoară elementele geometrice ale canalului și orificiului de sub stavilă (b, a).

Se deschide vana R și se stabilește un nivel T pe canal. După stabilizarea mișcării se măsoară adâncimile T și h_c respective sarcina pe

deversorul dreptunghiular h_d . Valorile măsurătorilor T , h_c , h_d sunt media a mai multor citiri.

Prin manevrarea vanei R se obțin diferite adâncimi T ale apei pe canal cuprins între $2a$ și $8a$. Pentru fiecare nivel în parte se măsoară elementele T , h_c , h_d . Valorile experimentale se notează în tabelul 18.2. Măsurătorile se efectuează pentru 8 – 10 poziții de deschidere a vanei R.

18.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Cu valorile măsurate T , h_c , h_d se calculează următoarele elemente:

- debitul: $Q = 1,38h_d^{2,5}$; (18.7)

- debitul specific: $q = Q/b$; (18.8)

- coeficientul de contracție: $\varepsilon = \frac{h_c}{a}$; (18.9)

- viteza de apropiere: $V_0 = \frac{Q}{bT}$; (18.10)

- sarcina sub care se face curgerea: $T_0 = T + \frac{V_0^2}{2g}$; (18.11)

- coeficientul de debit: $\mu = \frac{q}{a\sqrt{2g(T_0 - \varepsilon a)}}$. (18.12)

Valorile calculate se centralizează în tabelul 18.2

Cunoscând valorile coeficienților de debit și contracție cu relația (18.5) și (18.8) se construiește cheia debitelor pentru stăvilă pentru patru deschideri “a” și sarcini pe orificiu cuprinse între $2a$ și $8a$. Valorile calculate se trec în tabelul 18.3 și reprezintă grafic.

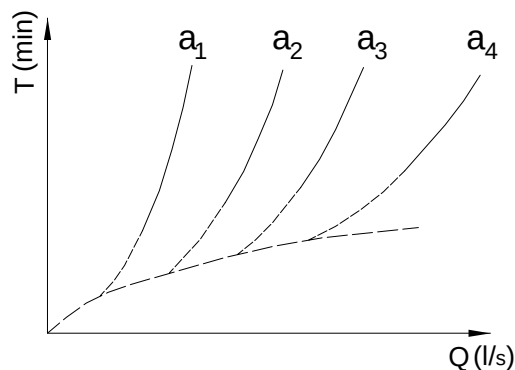


Fig. 18.4. Cheia debitelor la orificii mici de vană

Tabel 18.2. Rezultate experimentale pentru ε și μ la orificii mari

Nr crt	a (m)	b (m)	T (m)	h_c (m)	h_d (m)	Q (m ³ /s)	q (m ³ /sm)	ε	v_0 (m/s)	T_0 (m)	μ	Obs
-----------	------------	------------	------------	--------------	--------------	----------------------------	-----------------------------	---------------	----------------	--------------	-------	-----

Tabel 18.3. Cheia debitelor la orificiul de vană

Nr.crt.	A	T	ε	μ	Q
---------	-----	-----	---------------	-------	-----

LUCRAREA 19

DETERMINAREA TIMPULUI DE GOLIRE AL UNUI LAC DE ACUMULARE

19.1. CONSIDERAȚII GENERALE

O problemă importantă, des întâlnită în practică, este determinarea timpului de golire sau de umplere a unei acumulări. Aceste acumulări se realizează în diferite scopuri (irigații, piscicultură, atenuarea viiturilor, hidroenergetică sau scop multiplu) prin construirea unor baraje. În problema golirii lacurilor de acumulare se întâlnesc următoarele cazuri:

- golire prin debit defluent fără debit afluent;
- golire prin debit defluent cu debit afluent constant;
- golire prin debit defluent cu debit afluent variabil.

O caracteristică importantă a lacului de acumulare este dependența suprafeței oglinzii lacului și adâncime, $S=f(H)$

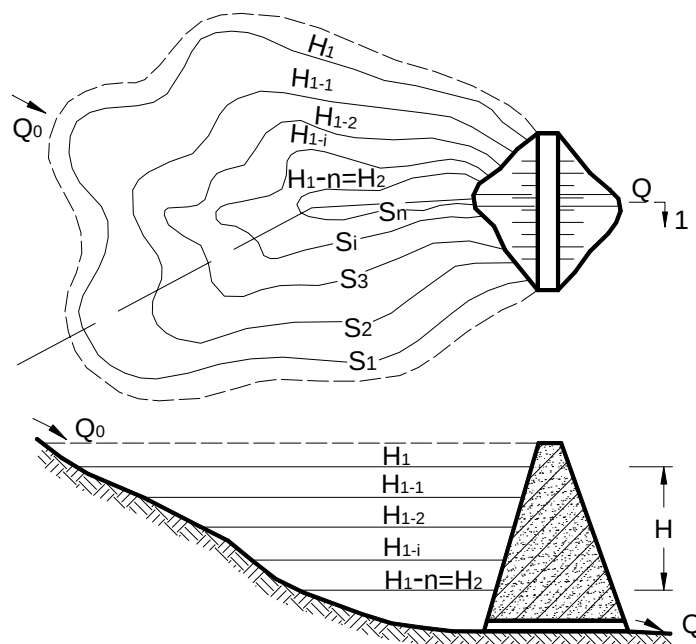


Fig. 20.1. Schema lacului de acumulare pentru calculul timpului de golire

a. Golirea lacului fără debit afluent

Pentru rezolvarea problemei se consideră golirea unui vas cu secțiune variabilă fără debit afluent. În acest caz timpul de golire de la nivelul H_1 la nivelul H_2 este:

$$T = \frac{1}{\mu A \sqrt{2g}} \int_0^H f(z) z^{-1/2} dz. \quad (19.1)$$

Variația suprafeței oglinzii lacului cu adâncimea nu se poate exprima sub forma $f(z)$, se folosește în calcule metoda Simpson care permite să se scrie expresia:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{\mu A \sqrt{2g}} \int_0^H f(z) z^{-1/2} dz = \\ &= \frac{1}{\mu A \sqrt{2g}} \int_{H_2}^{H_1} F(z) dz = \frac{1}{3\mu A \sqrt{2g}} (H_1 - H_2) \left(\frac{S_0}{\sqrt{H_1}} + \frac{4S_1}{\sqrt{H_1-1}} + \frac{2S_2}{\sqrt{H_1-2}} + \frac{4S_3}{\sqrt{H_1-3}} + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + \frac{2S_{n-2}}{\sqrt{H_1-(n-2)}} + \frac{4S_{n-1}}{\sqrt{H_1-(n-1)}} + \frac{S_n}{\sqrt{H_1-n}} \right). \end{aligned} \quad (19.2)$$

Suprafețele $S_0, \dots, S_n$ se obțin prin planimetrarea suprafețelor corespunzătoare diferitelor cote.

Timpul de golire se poate calcula și prin diferențele finite:

$$t = \sum_1^n t_i = \sum_1^n \frac{v_i}{Q_i} = \frac{1}{4\mu A \sqrt{g}} \sum_{i=1}^n (S_i + S_{i-1})(h_i + h_{i-1})^{1/2}. \quad (19.3)$$

b. Golirea lacului cu debit afluent constant

În cazul în care lacul este alimentat cu un debit constant Q_0 timpul de golire se calculează cu ecuația (20.3) modificată:

$$t = \sum_1^n \frac{\Delta v_i}{Q_i - Q_0} = \sum_1^n \frac{(S_i + S_{i-1})(h_i + h_{i-1})}{4[\mu A \sqrt{g}(h_i + h_{i-1}) - Q_0]}. \quad (19.3')$$

c. Golirea lacului cu debit afluent variabil

În cazul debitului afluent variabil, acesta se determină din hidrograful debitelor afluate iar calculele se fac din aproape în aproape:

$$t = \sum_1^n \frac{\Delta v_i}{Q_i - Q_0}. \quad (19.4)$$

În relațiile (19.1 ... 19.4) pasul de integrare este $\frac{H_1 - H_2}{n} = \frac{H}{n}$.

19.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este determinarea timpului de golire al unui lac de acumulare fără debit afluent, precum și cu debit afluent constant și compararea acestuia cu timpul obținut pe cale teoretică.

19.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig. 19.2) se compune din lacul de acumulare (LA) cu suprafața delimitată de curbe de nivel echidistante. Acumularea creată prin barajul (B) în care este încorporată golirea de fund (GF) cu posibilitate de închidere prin dopul (D). Alimentarea instalației de la rețeaua de alimentare (RA) se realizează pe două căi direct, prin robinetul R_1 sau prin rezervorul de nivel constant (RNC) prin robineții R_2 , R_3 și rotametrul (QRM). Nivelul apei din lac se controlează prin tubul piezometric (TP). Nivelul apei din lac se controlează prin tubul piezometric (TP).

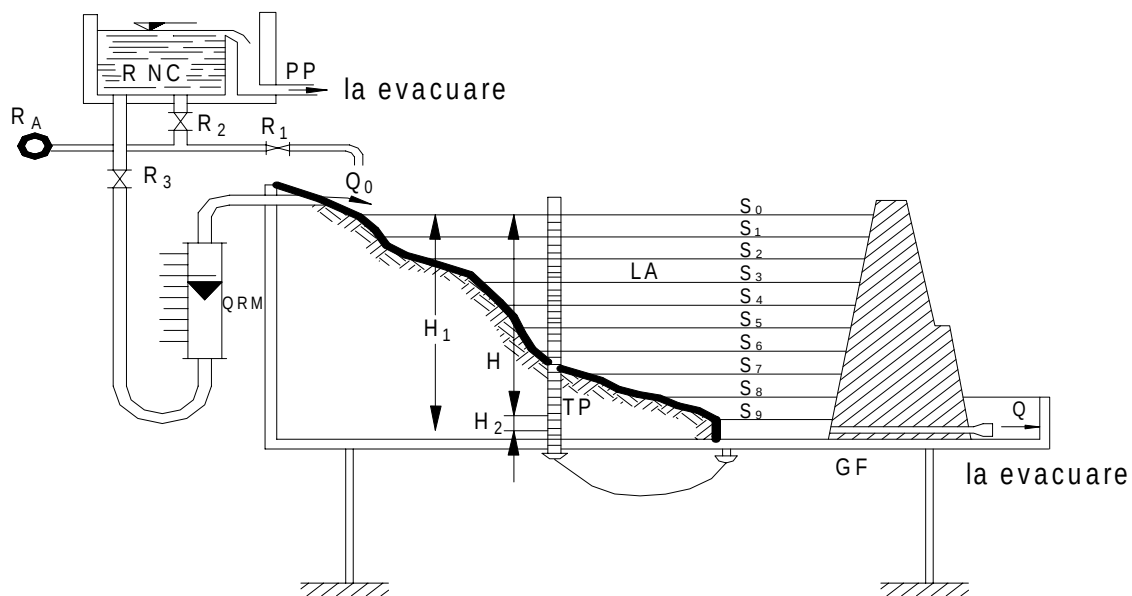


Fig. 19.2. Instalația experimentală

19.4. MODUL DE LUCRU

Se planimetrează suprafețele cuprinse între curbele de nivel și se trec în tabelul 19.1.

Determinarea timpului de golire a acumulării fără debit afluent, comportă următoarele operații:

- se umple lacul (LA) cu apă până la nivelul H_1 deschizând robinetul R_1 , golirea de fund (GF) fiind închisă cu dopul D;

- după liniștirea apei în lac se deschide golirea de fund și se evacuează apa până la nivelul H_2 dorit, timpul de curgere fiind cronometrat. Operația se repeta cel puțin de două ori.

În cazul determinării timpului de golire al acumulării cu debit afluent se procedează astfel:

- se umple lacul cu apă în mod analog ca în cazul precedent; se calculează debitul mediu de golire al lacului fără debit afluent care va indica mărimea debitului de alimentare;

- se deschide robinetul R_2 astfel ca preaplinul (PP) să evacueze apa; după liniștirea apei în lac se deschide concomitent golirea de fund și alimentarea prin robinetul R_3 , fixând pe rotametrul debitul Q_0 la valoarea $1/4$ din debitul mediu de golire;

- se recomandă timpul necesar evacuării lacului până la nivelul dorit. Experiența se repeta cel puțin de două ori. Nivelul de evacuare trebuie să corespundă cu o curbă de nivel.

Rezultatele experimentale se trec în tabelul 19.2.

19.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR

Cunoscând suprafețele cuprinse între curbele de nivel $C_0 \rightarrow S_0$; $C_1 \rightarrow S_1$; $C_9 \rightarrow S_9$, coeficientul de debit și diametrul evacuării se calculează timpul de golire al lacului cu și fără debit de alimentare din relațiile 19.2, 19.3 și 19.3'. Valorile obținute se compară cu cele experimentale, apoi se calculează erorile relative.

Tabel 19.1. Elemente geometrice ale acumulării

Curba de nivel $C_i = H_i$ (cm)	Suprafața S_i (cm ²)	$\frac{S_i + S_{i-1}}{2}$ (cm ²)	$\frac{H_i + H_{i-1}}{2}$ (cm ²)	$V_i = \frac{s_i + s_{i-1}}{2}$ (cm ²)	V acum.
------------------------------------	---------------------------------------	---	---	---	------------

Tabel 19.2

Nr.crt	H_1 (cm)	H_2 (cm)	t (sec)	Q_0 (cm ³ /s)	$T_{2,3,4}$ (sec)	$\delta_t = \frac{T_{2,3,3'}}{T_{2,3,3'}} 100$	Obs
--------	---------------	---------------	--------------	-------------------------------	----------------------	--	-----

LUCRAREA 20

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CARACTERISTICILOR JETULUI DE LICHID

20.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Jetul sau vana de lichid este un curent de lichid care iese dintr-un orificiu sau ajutoraj și se dezvoltă într-un alt mediu (lichid sau gaz).

Se numesc jeturi neîmecate, vanele de lichid care se dezvoltă într-un gaz, iar vanele îmecate care se dezvoltă în același lichid.

În cazul când viteza inițială a jetului este mică înălțimea de ridicare a acestuia se calculează cu relația:

$$h = \frac{v_0^2}{2g}. \quad (20.1)$$

Pentru presiuni sub 6 – 7 m, unghiul θ sub care trebuie să țâșnească lichidul, ca să realizeze bătaia maximă, trebuie să fie 45° . Pentru presiuni 10 – 35 m, unghiul θ trebuie să fie cuprins între 30° și 40° .

Pentru jetul aspersoarelor distanța de bătaie maximă se obține pentru $\theta = 32^\circ$ (experiențele lui F.I. Pikalov).

Înălțimea și bătaia maximă a jetului sunt mai mici decât rezultă din formula teoretică a traiectoriei, însă cu atât mai apropiate de acestea cu cât presiunea este mai mică și diametrul ajutorajului mai mare.

Lansarea jetului depinde de forma ajutorajului care trebuie aibă unghi de convergență între $5 - 13^\circ$, iar diametrul $< 1/4$ din diametrul țevii pe care este montat ajutorajul.

Jetul iese din ajutoraj sub formă compactă, iar pe traseu se destramă până sub formă de picături. Funcție de forma jetului în spațiu se disting trei zone diferențiate pe sectoare:

- *zona I* – jet compact, transparent, care se subțiază spre aval și este caracteristic sectorului I

- *zona II* – fire de lichid cu bule de aer care începe în sectorul I, iar în sectorul II devine miezul jetului

- *zona III* – picături izolate începe din sectorul II, iar în sectorul III tot jetul se transformă în picături.

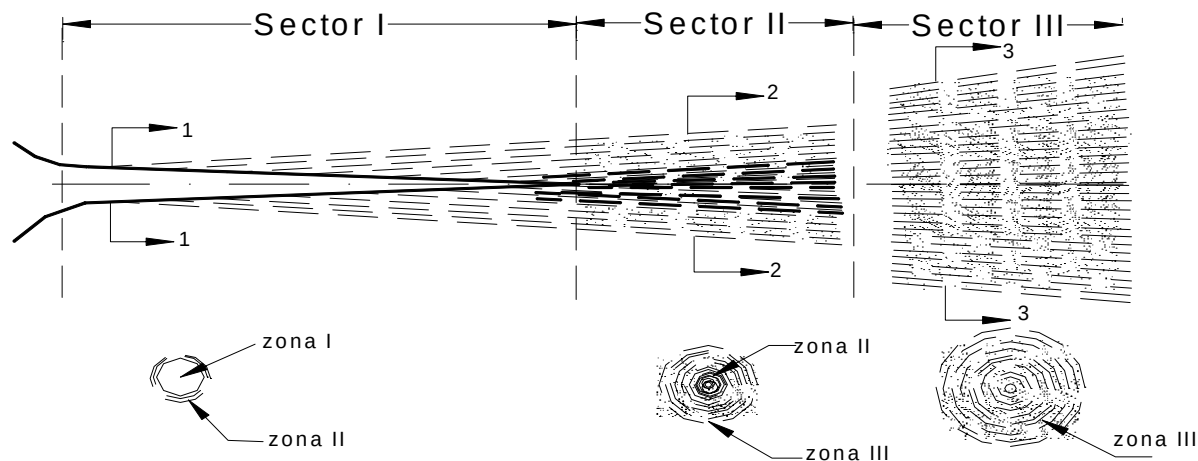


Fig. 20.1. Zonarea structurală a jetului de apă în atmosferă

Înălțimea reală a jetului se calculează cu relația:

$$H_v = \frac{H}{1 + \frac{0,00025}{1 + 100D^2} H} \quad (20.2)$$

Jetul se menține compact pe o rază, indiferent de înclinare:

$$H_c = R_c = \beta H_v, \quad (20.3)$$

în care:

H_c este înălțimea jetului compact;

R_c - rază pe care se menține jetul compact;

H_v - înălțimea reală a jetului;

β - coeficient (tabelul 20.1).

Tabel 20.1

H_v (m)	7,0	9,5	12,0	14,5	17,2	20,0	21,9	24,5	26,8	30,5
β	0,840	0,840	0,835	0,825	0,815	0,805	0,790	0,785	0,760	0,725

Înfășurătoarea jetului se obține din relația (fig. 20.2):

$$R = \varphi \cdot H_v.$$

Valorile coeficientului φ funcție de înclinarea jetului θ sunt prezentate în tabelul 20.2, iar traseul și zonarea jetului în atmosferă – în fig. 20.2.

Tabel 20.2. Valorile coeficientului φ funcție de înclinarea jetului θ

θ°	15	30	45	60	75	90
φ	1,30	1,20	1,12	1,07	1,03	1,00

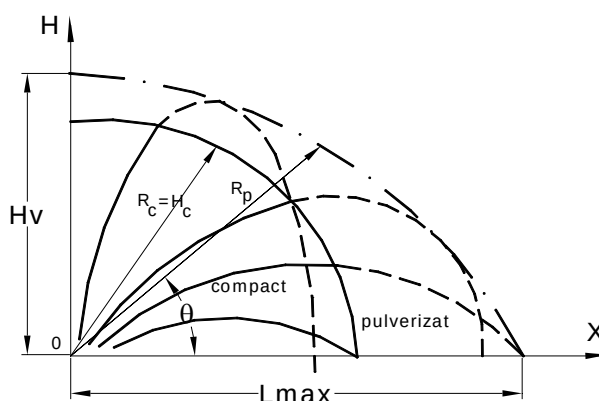


Fig. 20.2. Traseul și zonarea jetului în atmosferă

Jetul de lichid are aplicații multiple în lucrările de îmbunătățiri funciare, este folosit de hidromonitoare, la instalațiile pentru crearea ploii artificiale, etc.

20.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este studiul experimental al jetului de aspersor pe zone și sectoare, stabilirea unghiului pentru bătaie maximă, observarea experimentală a unor tipuri de spărgătoare de jet pentru îmbunătățirea mărimii picăturilor și distribuției ploii artificiale.

20.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pe un cerc vertical (1) al unui tahimetru (fig. 20.3), în locul lunetei, este montat un ștuț (4) prevăzut de la ieșire cu un ajutor de aspersor. Accesul apei și presiunea se reglează din robinetul (5).

Rotirea cu unghiul θ a cercului vertical este permis prin racordarea ansamblului prezentat la rețea printr-un furtun elastic (6). Se observă traiectoria jetului (7) pe caroiajul de sârma (10), din 0,5 în 0,5m. distanță de

bătaie se măsoară pe abscisa (8), marcată în unități de lungime. Unghiul de înclinare θ se citește pe cercul vertical gradat cu dispozitivul de citire (2). Presiunea sub care se face curgerea se citește la multimanometru (9).

20.4. MODUL DE LUCRU

Se măsoară elementele geometrice ale ajutorajului: diametrul D și unghiul de convergență θ .

Se montează ajutorajul (3) pe ștuțul (4) și se închide robinetul (5) până ce manometrul indică circa 3 mCA.

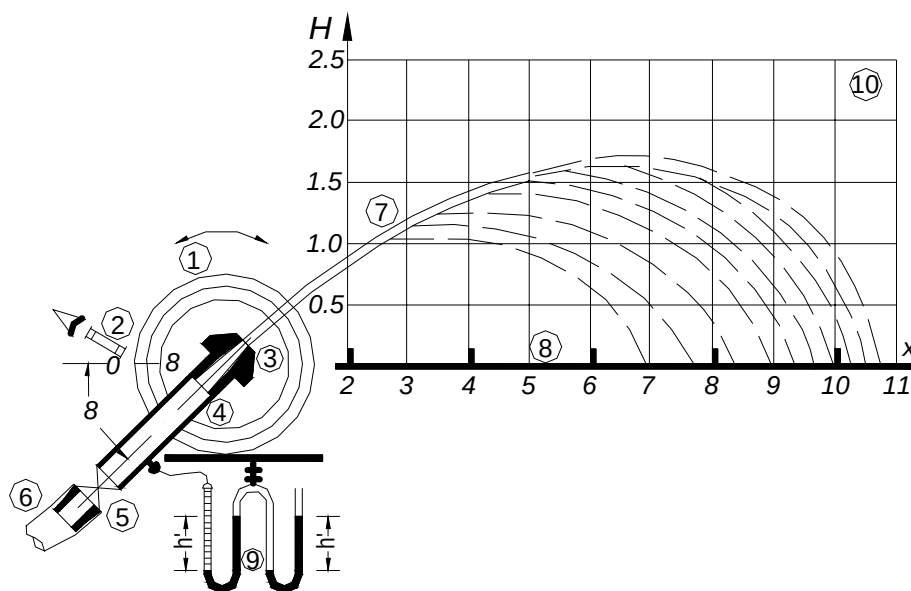


Fig. 20.3. Instalația experimentală pentru studiul jetului de aspersor

Se deblochează eclimetrul și se rotește până ce se obține pentru jet bătaia maximă aproximativă. Se blochează eclimetrul și din șurubul de fină mișcare și se modifică unghiul θ până se obține bătaia maximă a jetului.

În această poziție se citește unghiul θ , presiunea $h' + h''$ și coordonatele centrului jetului în cel puțin 8 puncte. Diferite înclinări θ ale jetului se repetă operațiunile menționate. Rezultatele se trec în tabelul 20.3

Se repetă operațiunile menționate pentru presiuni de circa 5, 10 și 15 mCA (nu se mai citesc coordonatele jetului).

La sfârșitul experiențelor se oprește funcționarea instalației prin închiderea robinetului.

Montând diferite spărgătoare de jet în diferite poziții se observă structura jetului. Concluziile se trec în finalul referatului.

20.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Cu elementele măsurate H , θ , x_i , H_i se calculează H_v , R , H_c care se compară cu elementele măsurate. Valorile (x_i, H_i) se reprezintă grafic și se trasează înfășurătoarea curbelor.

Tabel 20.3. Rezultate experimentale cu caracteristicile jetului de aspersor

Nr. crt.	H (mCA)	θ	x_1 H_1	x_2 H_2	x_3 H_3	x_4 H_4	x_5 H_5	x_6 H_6	x_7 H_7	x_8 H_8	H_v (m)	R (m)	H_c (m)
-------------	--------------	----------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	--------------	------------	--------------

LUCRAREA 21

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR HIDRAULICI AI DEVERSOARELOR

21.1. CONSIDERAȚII TEORETICE

Deversoarele sunt construcții de o anumită formă prin care curentul de lichid, curge ca un curent cu suprafața liberă. Peste construcție, curentul de lichid ia forma unei lame deversante care se poate lipi de construcție sau desprinde de aceasta mai ales când este aerat spațiul de sub lamă.

Un deversor prezintă două mari categorii de elemente și anume:

a. Elemente geometrice:

- grosimea peretelui deversorului, δ ;
- lungimea coronamentului deversorului, b ;
- înălțimea pragului deversor, p_1 linie măsurat în amonte;
- înălțimea pragului deversor, p - măsurat în aval;
- forma în secțiune a profilului transversal.

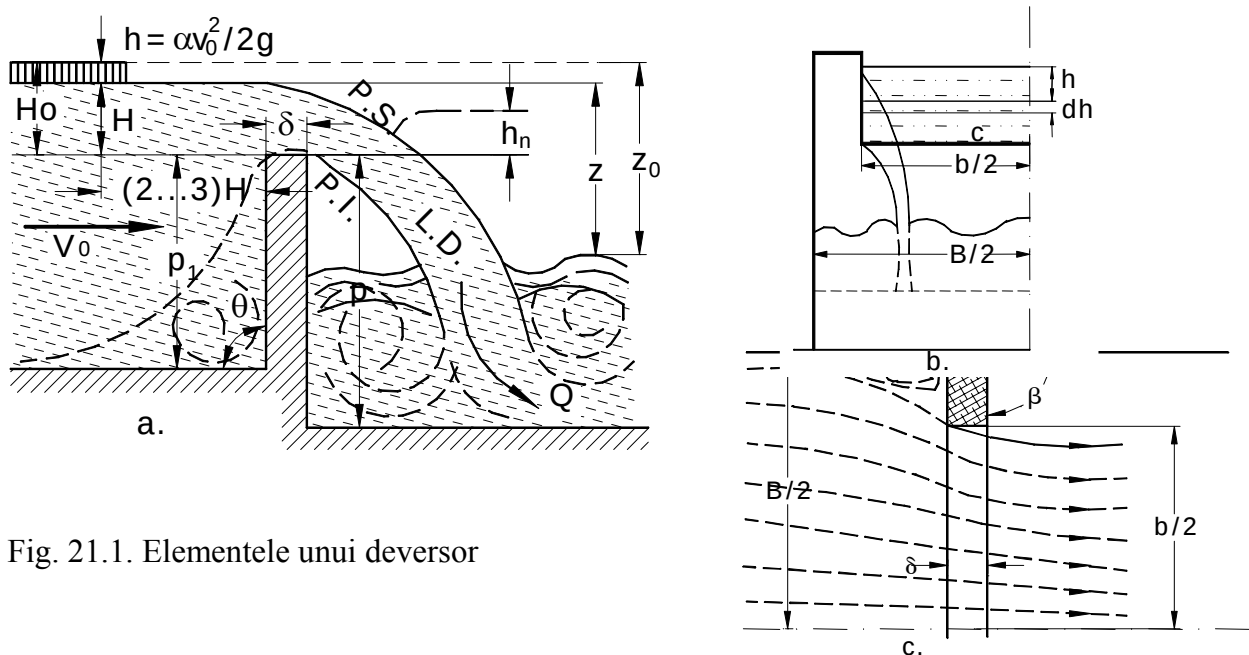


Fig. 21.1. Elementele unui deversor

b. Elemente hidraulice:

- sarcina deversorului, H – definită ca fiind înălțimea măsurată de la cota crestei deversorului, la cota luciului la o distanță $l = (2 - 3) h$ de creasta acestuia; h fiind înălțimea de apă măsurată chiar pe creasta deversorului;
- viteza de acces, v_0 – viteza medie în amonte de deversor;
- sarcina totală a deversorului, H_0 :

$$H_0 = H + \frac{\alpha v_0^2}{2g}; \quad (21.1)$$

- căderea la deversor, z – diferența dintre nivelul amonte față de cel aval;

- căderea totală la deversor, z_0 :

$$z_0 = z + \frac{\alpha v_0^2}{2g}; \quad (21.2)$$

- înălțimea de înecare a deversorului, h_n - diferența dintre cota crestei deversorului și cota apei din aval:

$$h_n = H - z. \quad (21.3)$$

După diverse criterii deversoarele se pot clasifica astfel:

- a.** după forma profilului și grosimii peretelui (fig. 21.2) pot fi:

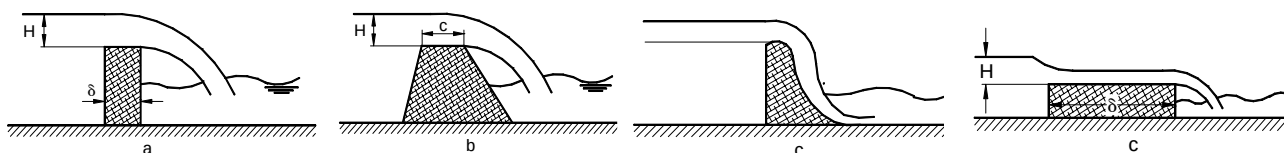


Fig. 21.2. Tipuri de profile transversale ale deversoarelor

cu perete subțire, având $\delta \leq (0,1 + 0,5)H$, cu perete gros (poligonal sau curviliniu) – la care $0,7 H < \delta < 3 H$ și cu prag lat cu $3H < \delta < 10H$.

- b.** după forma secțiunii de curgere (fig. 21.3) pot fi: cu secțiune dreptunghiulară, triunghiulară, trapezoidală, circulară, parabolică etc.

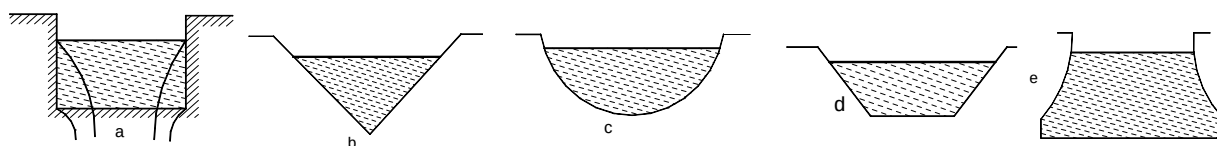


Fig. 21.3. Secțiuni transversale de curgere peste deversoare

c. după contracție: aceasta poate fi totală, parțială sau fără contracție.

d. după forma pânzei deversate (fig. 21.4.), aceasta poate fi: liberă, aerată, neaerată și lipită.

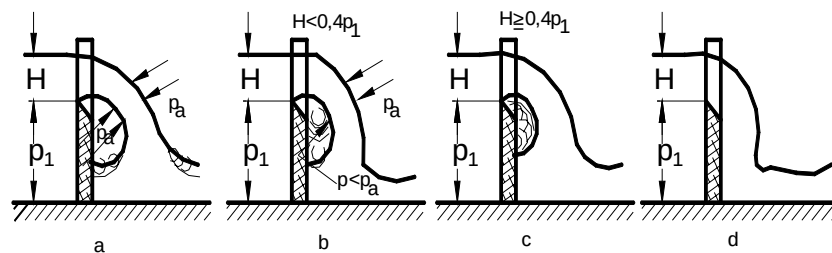


Fig. 21.4. a, b, c, d. Formele pânzei deversante la deversor cu muchie ascuțită

e. după poziția nivelului apei în aval (fig. 21.5) pot fi: deversoare perfecte sau neîncate și încate.

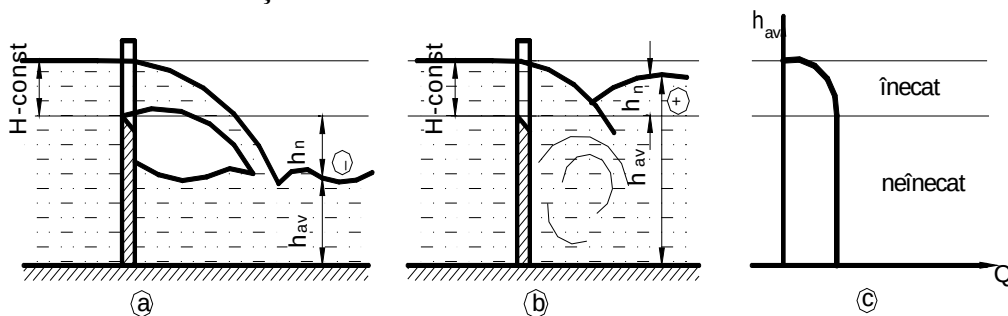


Fig. 21.5. a, b. Deversor cu curgere neîncată și încată

f. după poziția lor în canal (fig. 21.6) deversoarele pot fi: normale, oblice, laterale, poligonale, curbe, pâlnie etc.

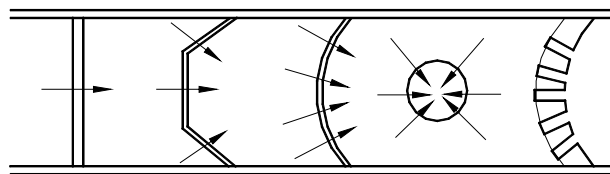


Fig. 21.6. Clasificarea deversoarelor după forma în plan

Relația generală de calcul a deversoarelor este:

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{\frac{2}{3}}, \quad (21.4)$$

sau când nu poate fi neglijată influența vitezei de acces asupra sarcinii, devine:

$$Q = mbH_0^{\frac{3}{2}}, \quad (21.5)$$

în care:

Q este debitul peste deversor;

m – coeficientul de debit al deversorului;

b – lățimea la creastă a deversorului;

H – sarcina pe deversor.

Coeficientul de debit al deversorului variază în limite destul de largi, funcție de tipul deversorului și modul de exploatare, cu valori cuprinse între $m = 0,30$ și $m = 0,55$. Dacă se notează cu σ coeficient de înecare, ε coeficient de contracție laterală și k coeficientul de oblicitate a deversorului se poate exprima coeficientul de debit al deversorului ca produsul lor:

$$m = m_0 \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot k, \quad (21.6)$$

în care m_0 este coeficient de formă depinzând de profilul transversal.

21.1.1. Deversorul cu perete subțire

Clasificarea în aceasta categorie a deversoarelor se face după criteriul raportului între grosimea peretelui și înălțimea sarcinii astfel:

$$\delta \leq (0,1 - 0,5)H, \quad (21.7)$$

sau

$$\frac{\delta}{H} \leq \frac{1}{1,51 + 0,041 \frac{4}{P_1}}. \quad (21.8)$$

La deversoarele cu muchie ascuțită lama de apă se desprinde de creasta deversorului, luând forma unei lame libere aerate. Când deversorul este executat ca în fig. 21.1, se numește deversor cu muchie ascuțită.

Debitul se calculează cu relația (21.4) iar coeficientul de debit m cu relația lui Bazin:

$$m_0 = 0.405 + \frac{0.0027}{H}. \quad (21.9)$$

Viteza de acces intervine cu factorul de corecție (21.10) dacă nu considerăm sarcina totală H_0 , iar coeficientul de debit va fi:

$$m = m_0 - m_1 \quad \text{și} \quad m_1 = 1 + 0,55 \left(\frac{H}{H + P_1} \right)^2. \quad (21.10)$$

De asemenea folosind formula Rehbock valabilă numai în condiția:

$$\frac{H}{P_1} \leq 5 + 10, \quad (21.11)$$

se poate calcula coeficientul m_0 astfel:

$$m_0 = 0,404 + 0,054 \frac{H}{P_1} + \frac{0,001}{H}. \quad (21.12)$$

Pentru deversoarele care prezintă fenomenul de contracție, coeficientul de debit va fi de forma:

$$m_0 = m'_0 m'_1, \quad (21.13)$$

în care:

$$\begin{cases} m'_0 = 0,385 + 0,025 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{2,41 - 2 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1000H + 1,6} \\ m'_1 = 1 + 0,55 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{H}{H + P_1} \right)^2 \end{cases} \quad (21.14)$$

Aceste relații sunt valabile în limitele $P \geq 0,3 \text{ m}$; $0,025 < H \leq 0,8 \text{ m}$; $H/P_1 < 1 \dots 2$; $b > 0,3 B$.

Pentru ca un deversor cu muchie ascuțită să aibă o curgere înecată trebuie îndeplinite condițiile:

$$h_n = H - z > 0 \text{ și } \frac{z}{P} < \left(\frac{z}{P} \right)_{cr}. \quad (21.15)$$

Mărimea $\left(\frac{z}{P} \right)_{cr}$ are o valoare medie de 0,75 iar coeficientul de înecare notat cu σ se poate calcula cu relația:

$$\sigma = 1,05 \left(1 + 0,2 \frac{h_n}{P} \right)^3 \sqrt[3]{\frac{z}{H}} \quad (21.16)$$

sau se poate determina din tabelul 21.1 funcție de adâncimea relativă de înecare h_n/P și căderea relativă $\frac{z}{P}$.

Tabel 22.1

z/P	h_n/P						
	0.00	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40
0.05	1.05	0.84	0.74	0.68	0.64	0.58	0.54
0.10	1.05	0.93	0.85	0.80	0.76	0.70	0.66
0.20	1.05	0.98	0.94	0.90	0.87	0.82	0.79
0.30	1.05	1.01	0.97	0.94	0.92	0.88	0.85
0.40	1.05	1.02	0.99	0.97	0.95	0.92	0.90
0.50	1.05	1.03	1.01	0.99	0.98	0.95	0.93
0.60	1.05	1.03	1.02	1.00	0.99	0.98	0.96
0.70	1.05	1.04	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98
z/P	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	
0.05	0.52	0.50	0.48	0.47	0.46	0.45	
0.10	0.64	0.61	0.60	0.58	0.57	0.57	
0.20	0.76	0.74	0.72	0.71	0.70	0.69	
0.30	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	
0.40	0.88	0.87	0.85	0.84	0.84	0.83	
0.50	0.92	0.90	0.89	0.89	0.88	0.87	
0.60	0.94	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	
0.70	0.98	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	

Cele expuse mai sus la punctul 21.1 aparțin deversorului cu perete subțire de forma dreptunghiulară. Dacă deversorul are secțiunea de scurgere trapezoidală relația de calcul a debitului va fi:

$$Q = m\varepsilon(b_0 + 0.8tg\alpha.H)\sqrt{2gH^{3/2}}, \quad (21.17)$$

în care:

b_0 este baza mică a trapezului;

α - unghiul pe care îl face verticala cu peretele înclinat al deversorului.

Pentru măsurarea debitelor mici se poate folosi un deversor cu secțiune triunghiulară cu relația de calcul a debitului:

$$Q = \frac{8}{15} \mu tg\alpha \sqrt{2g} H^{5/2} \quad (21.18)$$

dacă se ia $2\alpha = 90^\circ$ și $\mu = 0.6$ rezultă:

$$Q = 1.42H^{2.5}; \quad Q = mH^{2.5}. \quad (21.19)$$

Pentru determinarea precisă a coeficientului de debit se poate folosi următoarea relație:

$$m = \left(0,310 + \frac{0,002}{H} \right) \left(1 + \frac{A_d^2}{A_0^2} \right), \quad (21.20)$$

în care:

m este coeficientul de debit al deversorului;

A_d - secțiunea de curgere a deversorului;

A_c - secțiunea canalului amonte de deversor.

21.1.2. Deversoare cu perete gros

Pentru ca un deversor să fie cu perete gros (fig.21.7) trebuie îndeplinită condiția:

$$0,6 \leq \delta / H \leq 2,5. \quad (21.21)$$

În această categorie intră deversoarele cu profil dreptunghiular, trapezoidal, profil practic curb și în general deversoarele cu profil polygonal.

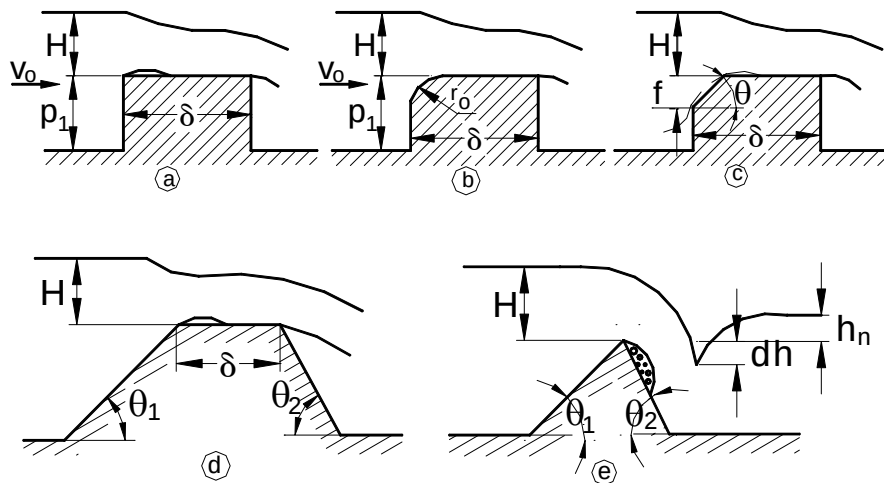


Fig. 21.7. Deversoare cu perete gros

21.1.2.1. Deversoare dreptunghiulare

Relația de calcul a debitului este:

$$Q = mb\sqrt{2gH}^{3/2}, \quad (21.22)$$

în care H_0 este sarcina totală a deversorului.

Coeficientul de debit în condiții normale se poate calcula la un deversor cu muchie de intrare în unghi drept astfel:

$$m_0 = 0.132 + 0.05(2.5 - \delta / H) \quad (21.23)$$

și la un deversor cu muchia de intrare rotunjită ($r = 0.2 H$), cu relația:

$$m_0 = 0.36 + 0.1 \frac{2.5 - \frac{C}{H}}{L + 2 \frac{C}{H}}. \quad (21.24)$$

Dacă nu este îndeplinită condiția $P_1/H \geq 3$ se aplică o corecție a coeficientului de debit m_0 , dată de relația:

$$k_v = 1 + 0.13 \frac{H}{P}. \quad (21.25)$$

În situația unei contracții laterale la aceste deversoare, se introduce un coeficient de contracție ε conform relației:

$$\varepsilon = 1 - 0.1 \sum Ce \frac{H_0}{b}, \quad (21.26)$$

în care $\sum Ce$ este suma coeficienților care depind de forma obstacolului iar lungimea redusă a crestei va fi:

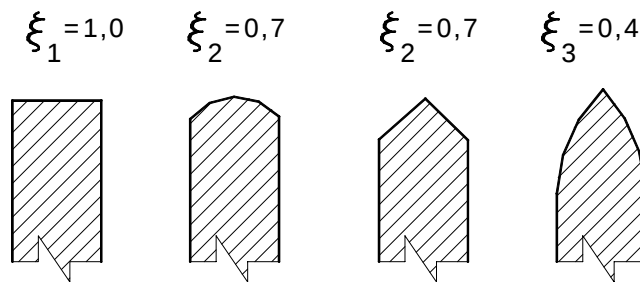
$$b_c = \varepsilon \cdot b. \quad (21.27)$$

Dacă curgerea este înecată se poate calcula coeficientul de înecare cu formula (21.16) sau se pot lua valorile din tabelul 21.2.

Tabel 21.2

m/H_0	σ	h_n/H_0	σ	H_n/H_0	σ	h_n/H_0	σ
0.00	1.000	0.30	0.991	0.55	0.965	0.80	0.760
0.10	0.998	0.35	0.988	0.60	0.957	0.85	0.700
0.15	0.997	0.40	0.983	0.65	0.947	0.90	0.590
0.20	0.996	0.45	0.987	0.70	0.933	0.95	0.410
0.25	0.994	0.50	0.972	0.75		1.00	0.000

Coeficientul Ce și forma marginii obstacolului sunt redată în fig. 21.8.

Fig. 21.8. Forme și valorile lui C_e

21.1.2.2. Deversoare cu profil trapezoidal

Spre deosebire de deversorul dreptunghiular apar la acest tip doi parametri suplimentari și anume:

- $m_1 = \operatorname{ctg} \alpha$ - coeficientul de taluz al parametrului amonte;
- $m_2 = \operatorname{ctg} \alpha$ - coeficientul de taluz al parametrului aval.

Unul din acești parametri poate avea valoarea zero. Coeficientul de formă, m_0 , depinde și de acești doi parametri conform tabelului 21.3

Tabel 21.3

P_1/H_0	Coeficientul taluzului		P/H			
	m_{am}	m_{av}	0.5	0.7	1.0	2.0
0.5...2	0	3	0.42	0.40	0.36	0.34
	0	5	0.38	0.37	0.35	0.34
	0	10	0.36	0.36	0.35	0.34
	3	0	0.47	0.44	0.40	0.37
	5	0	0.46	0.44	0.40	0.37
2...3	10	0	0.43	0.42	0.39	0.36
	0	1	0.46	0.42	0.37	0.33
	0	2	0.42	0.40	0.36	0.33
	1	0	0.46	0.43	0.39	0.36
	2	0	0.47	0.44	0.40	0.37

Curgerea peste aceste deversoare se poate produce cu o lamă liberă aerată, lamă aderentă cu o curgere înecată.

21.1.2.3. Deversoare cu profil curb

În secțiunea transversală, profilul acestor deversoare este o curbă (fig. 21.9), sau conține elemente curbe. Pentru ca lama deversantă să nu se dezlipească de coronament, se dă deversorului un profil curb care poate produce o curgere cu sau fără vacuum. Cele mai folosite profile sunt următoarele: Creager, Ofiterov și WES. Coordonatele acestor profile sunt date în literatura de specialitate funcție de sarcina de calcul precum și coeficienții de debit.

Debitul peste aceste deversoare se calculează cu relația (21.5), iar când sarcina nu corespunde cu sarcina de calcul (H_c) se corectează valorile coeficientului de debit. Astfel pentru un profil curb Creager-Ofiterov tip A cu coeficientul $m_0 = 0.49$, corecția va fi:

- când $\frac{H}{H_c} \leq 0.8$: $m = m_0 m_1 = 0.49(0.785 + 0.25 \frac{H}{H_c})$; (21.28)

- când $\frac{H}{H_c} > 0.8$: $m = m_0 = m_1 = (0.88 + 0.12 \sqrt{\frac{H}{H_c}}) 0.49$. (21.29)

Asupra coeficientului de debit se vor face corecții privind contracția, înecarea etc., conform relațiilor (21.16) și (21.26).

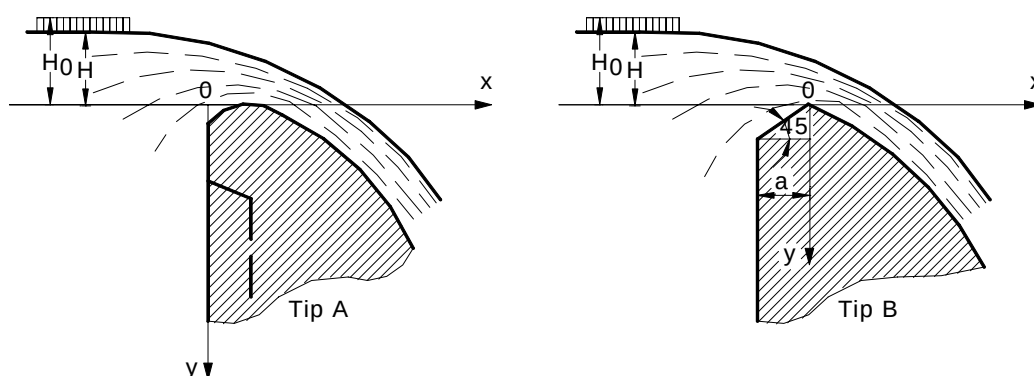


Fig. 21.9. Deversor cu profil curb (Creager – Ofițerov)

22.1.3. Deversoarele cu prag lat

Deversoarele cu prag lat (fig.21.4) se situează în domeniul $3 \leq \delta/H \leq 8$. Dacă raportul δ/H crește peste valoarea 8 (poate atinge valoarea $\delta/H = 12$), pe prag se instalează o mișcare gradual variată ceea ce duce la variația adâncimii h pe prag. Determinarea debitului la un deversor cu prag lat se face cu relația (21.5) în care coeficientul de formă m_0 poate lua următoarele valori funcție de raportul P_1/H (formulele lui Berezinski):

a. când $P_1/H \geq 3$:

- prag cu muchie rotunjită, $m_0 = 0.36$;

- prag cu muchie vie, $m_0 = 0.32$.

b. cazul când $P_1/H < 3$:

- prag cu muchie rotunjită, $m_0 = 0.36 + 0.01 \frac{3 - \frac{P_1}{H}}{1.2 + 1.5 \frac{P_1}{H}}$; (21.30)

- prag cu muchie vie, $m_0 = 0.032 + 0.01 \frac{3 - \frac{P_1}{H}}{0.46 + 0.75 \frac{P_1}{H_1}}$; (21.31)

Dacă notăm cu h_1 sarcina măsurată pe deversor și raportul:

$$\frac{h_1}{H_0} = K = k, \quad (21.32)$$

iar cu φ - coeficientul de viteză, rezultă un nou tip de relație de calcul a debitului și anume:

$$Q = \varphi \cdot b \cdot h_1 \sqrt{2g(H_0 - h_1)} \text{ sau } Q = \varphi \cdot k \cdot b \cdot H_0 \sqrt{(1 - k)2gH_0} \quad (21.33)$$

Coeficientul de debit are o structură în acest caz de forma următoare:

$$m = \varphi \cdot k \sqrt{1 - k}. \quad (21.34)$$

Valorile sale sunt calculate în tabelul 21.4

Tabel 21.4

m	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38	0.385
φ	0.951	0.954	0.961	0.967	0.974	0.983	0.994	1.00
k	0.457	0.477	0.500	0.527	0.558	0.596	0.641	0.667

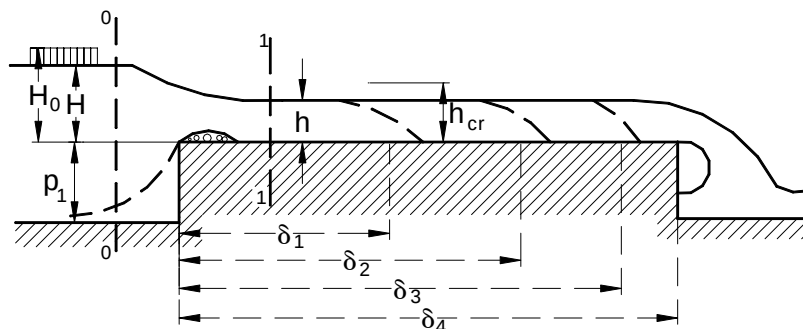


Fig. 21.10. Deversor cu prag lat cu curgere neînecată

Coeficientul de contracție laterală după Berezinski se poate calcula astfel:

$$\varepsilon = 1 - \frac{a}{\sqrt[3]{0.2 + \frac{P_1}{H}}} \sqrt[4]{\frac{b}{B} \left(L - \frac{b}{B} \right)}, \quad (21.35)$$

în care “ a ” este un coeficient cu valorile:

$a = 0.19$ pentru prag și margini verticale cu muchii vii și cu unghi drept;

$a = 0.10$ pentru prag cu muchie de intrare vie sau rotunjită și margini verticale rotunjite.

În situația înecării deversorului cu prag lat se poate folosi formula generală (21.5) în care se introduce coeficientul de înecare σ conform tabelului 21.5.

Deoarece asupra deversoarelor folosite în tehnică, acționează o multitudine de factori, coeficientul de debit trebuie determinat riguros și pe cale experimentală. Pentru a se exclude influența modificării valorii coeficientului de debit față de cel calculate pentru sarcina de calcul, se trasează cheia limnimetrică a deversorului – $Q = f(H)$.

Tabel 21.5

H_n / H_0	σ	h_n / H_0	σ	H_n / H_0	σ	h_n / H_0	σ
0.80	1.00	0.85	0.96	0.90	0.84	0.95	0.65
0.81	0.995	0.86	0.95	0.91	0.82	0.96	0.59
0.82	0.990	0.87	0.93	0.92	0.78	0.97	0.50
0.83	0.98	0.88	0.90	0.93	0.74	0.98	0.40
0.84	0.97	0.89	0.87	0.94	0.70	-	-

21.2. SCOPUL LUCRĂRII

21.2.1 Pe instalația experimentală din laborator, se va determina coeficientul de debit și se va trasa cheia limnimetrică (fig.21.11), pentru un deversor cu perete subțire dreptunghiular, fără contracție laterală.

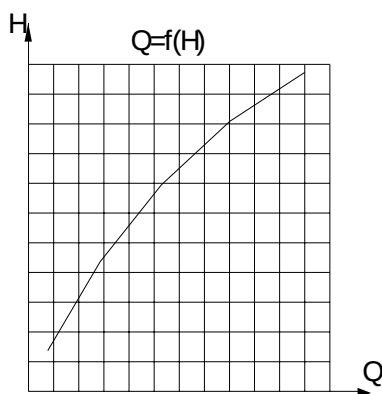


Fig. 21.11. Cheia limnimetrică a deversorului

21.2.2 Idem pentru un deversor cu profil practic curb.

21.2.3 Idem pentru un deversor cu prag lat.

De asemenea se vor compara valorile experimentale cu cele calculate cu formulele teoretice.

21.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

21.3.1. Pentru studiul acestei probleme, pe canalul vitrat (fig. 21.12) al Laboratorului, se va monta un deversor cu perete subțire, dreptunghiular, fără contracție laterală (2), prevăzut cu dispozitiv de aerisire al lamei deversante. Canalul vitrat al laboratorului este alimentat de la stația de pompare printr-o conductă (4), pe care se află montată o vană (5). Evacuarea se va face în centura de canale (6) al laboratorului, pe care se află montat deversorul de măsură a debitului (7). Reglarea nivelului apei pe canal se realizează, cu ajutorul unei stavile articulate (8), montată la extremitatea aval a canalului. Măsurarea înălțimilor de apă se realizează cu ajutorul unor limnimeetre cu ac (9).

21.3.2. Pentru studiul deversorului cu profil practice curb și a celui cu prag lat, se folosește aceeași instalație, montând deversorul respectiv, în locul aferent canalului vitrat.

21.4. MODUL DE LUCRU

21.4.1. Deversorul cu perete subțire

Studiul problemei necesită următoarele operații:

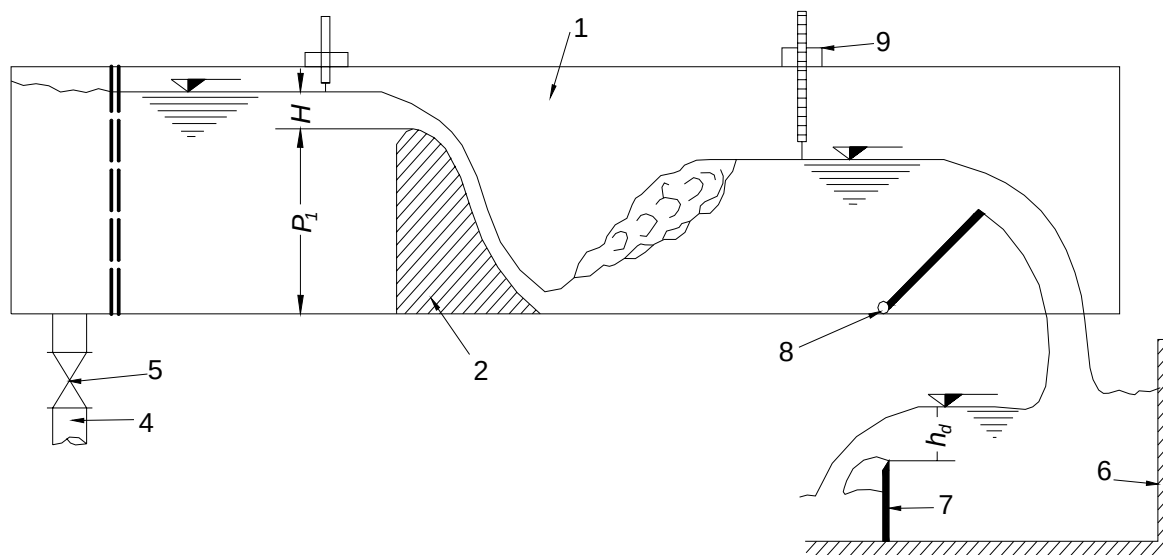


Fig. 21.14. Instalația experimentală

21.4.1.1. Cazul deversorului neînecat:

- se măsoară elementele geometrice ale canalului și deversorului, respectiv b , B , p_1 , p și se determină cotele "0" la limnimetre;
- se deschide vana (5) cu un număr de rotații și se așteaptă un interval de timp, până se stabilizează o înălțime de apă pe deversor (ecartul de înălțimi va fi de 0.02 ± 0.15 m);
- se măsoară înălțimea de apă " h " pe creasta deversorului care înmulțită cu 3 dă valoarea lungimii la care în amonte se va măsura sarcina " H " a deversorului; concomitent la măsoară la deversorul de măsură a debitului, sarcina " h_d " corespunzătoare;
- se modifică debitul pe canal și se repetă operațiile de măsurare a înălțimilor de apă pe cele două deversoare; operațiile se repetă de circa 10 - 15 ori, obținându-se perechile de valori " $H-h_d$ ";
- după terminarea experimentelor se închide vana (5) și se oprește stația de pompare.

Observație - intervalul de 10-15 valori ale sarcinii pe deversor, se parcurge prima dată în ordine crescătoare până la valoarea maximă și apoi în ordine crescătoare până la valoarea minimă.

21.4.1.2. Cazul deversorului înecat:

- pentru a se realiza înecarea, se ridică stăvilarul de pe capătul canalului vitrat, la o înălțime oarecare dar care să realizeze condiția impusă;
- în afară de perechile de valori " $H - h_d$ ", se va măsura și înălțimea apei din aval care va permite calcularea înălțimii de înecare;
- restul operațiilor sunt identice ca la punctul 21.4.1.1.

21.4.2. Deversor cu profil practice curb

Operațiile ce se execută sunt aceleași ca la punctul 21.4.1.1.(2), cu diferența că în această situație se va măsura distanța dintre pilele deversorului " b " și se va caracteriza forma pilei și a culeii, pentru determinarea coeficientului de contracție ε . Ecartul de debite la acest deversor trebuie să permită o variație a înălțimii de apă, pe creasta deversorului cuprinsă între 0.02+0.10 m. Viteza de apropiere se va determina cu o micromorișcă.

21.4.3 Deversorul cu prag lat

Pentru cazul deversorului neînecat, operațiile pregătitoare sunt aceleași ca la punctul 21.4.1.1. În continuare se efectuează următoarele operații:

- se măsoară sarcina “ H ” și cotele apei “ h ” în câteva puncte (3...5) a căror poziție este marcată pe deversor, precum și sarcina la deversorul de măsura a debitului;

- se determină viteza de apropiere cu o micromorișcă. Pentru cazul deversorului înecat se măsoară și adâncimea apei din aval (h_{av}).

21.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

21.5.1.1. Deversorul cu perete subțire dreptunghiular neîncat

Debitul care trece peste deversor se calculează cu relația:

$$Q = mh_d^{2.5}, \quad (21.36)$$

în care h_d este sarcina măsurată la deversorul triunghiular; m – coeficientul de debit total al deversorului $m = 1.38$.

Coeficientul de debit “ m_{ex} ” experimental, rezultă din ecuația (21.4) în care se înlocuiesc elementele cunoscute și măsurate. Rezultă:

$$m_{ex} = \frac{Q}{b\sqrt{2gH^{2.5}}}. \quad (21.37)$$

Cu relația (21.9), (21.10), (21.12) se determină coeficientul de debit teoretic care se compară cu cel experimental calculând eroarea absolută. Perechile de valori Q - H se reprezintă grafic constituind cheia limnometrică a deversorului.

Datele se prelucrează în tabelul 21.6 și tabelul 21.7

Tabel 21.6 Prelucrarea valorilor experimentale

Nr. Crt.	h_d (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	m_{ex}	m_t (21.9)	m_t (21.10)	m_t (21.12)
----------	--------------	----------------------------	------------	----------	-----------------	------------------	------------------

Tabel 21.7 Calculul statistic

Nr. Crt.	m_t (21.9)	m_{ex}	m_t (21.10)	m_{ex}	m_t (21.12)	m_{ex}
----------	-----------------	----------	------------------	----------	------------------	----------

Valorile coeficientului de debit se prelucrează statistic în tabelul 21.7, rezultând valoarea cea mai probabilă.

21.5.1.2. Deversor cu perete subțire dreptunghiular înecat

Ordinea prelucrării rezultatelor este cea prezentată la punctul 21.5.1.1, la care se adaugă calculul înălțimii de înecare și a coeficientului σ , sau se calculează adâncimea relativă de înecare " h_n/p " și căderea relativă " z/p ", iar în tabelul 21.1 se scoate valoarea coeficientului σ . Datele se prelucrează în tabelul 21.8.

Tabel 21.8 Prelucrarea valorilor experimentale

Nr. crt.	h_d (m)	Q (m ³ /s)	H (m)	h_{av} (m)	Z (m)	h_n/p	z/p	σ_t (21.6)	σ_t	m_{ex}	m_t (21.9)
----------	--------------	----------------------------	------------	-----------------	------------	---------	-------	----------------------	------------	----------	-----------------

21.5.2. Deversor cu profil curb

Debitul se calculează cu relația (21.36). În relația de calcul a coeficientului de debit se introduce lungimea crestei redusă conform ecuației (21.27), unde coeficientul de contracție s-a calculat cu relația (21.26). Coeficientul de debit rezultă din ecuația (21.22), în care sarcina totală se calculează cu relația (21.1).

Deversorul folosit pentru studiu este de tip A –Creager-Ofiterov, cu coeficientul de formă $m_0 = 0.49$, iar sarcina de calcul $H_c = 0.10$.

Coeficientul de debit teoretic, în situația când deversorul funcționează neîneecat, pentru diverse valori ale sarcinii H se calculează cu relațiile (21.28, 21.29). Datele se prelucrează în tabelul 21.9

Tabel 21.9. Prelucrarea valorilor experimentale

Nr. crt.	h_d (m)	Q (m ³ /s)	V_0 (m/s)	H (m)	H_0 (m)	m_{ex}	m_t (21.28)	m_t (21.29)
----------	--------------	----------------------------	----------------	------------	--------------	----------	------------------	------------------

Perechile de valori $Q-H$ se reprezintă grafic, rezultând cheia limnometrică a deversorului.

În situația când deversorul funcționează cu scurgere înecată, se calculează adâncimile de înecare, care cu relația (21.16) permit determinarea coeficientului de înecare sau se determină direct din tabel acest coeficient. Datele se prelucrează într-un tabel asemănător cu tabelul 21.8.

21.5.3. Deversor cu prag lat

21.5.3.1. Deversor cu prag lat cu curgere neîneacă

Debitul peste deversor se calculează cu relația (21.36). Sarcina totală se calculează cu relația (21.1), pe baza măsurării vitezei de acces în amonte de deversor.

Se determină coeficientul de debit cu relația (21.5) folosind valorile măsurate.

Pentru determinarea teoretică a coeficientului de debit folosind formulele lui Berezinski, se verifică condiția $p_1/H \leq 3$, și se aplică relația (21.31), sau se ia $m_0 = 0.32$ pentru cazul adecvat.

Cu perechile de valori $Q-H$ se reprezintă cheia limnimetrică a deversorului cu prag lat neînecat. De asemenea se reprezintă linia apei măsurată prin valorile H_0 și h_i (în cele 5 puncte pe deversor) grafic.

Datele se prelucrează în tabelul 21.10.

21.5.3.2. Deversor cu prag lat cu curgere îneacă

După cum s-a arătat, curgerea pe deversor are un pronunțat caracter neuniform, astfel că ultima adâncime înregistrată pe prag tinde să devină egală cu adâncimea critică. Înecare are loc când adâncimea de înecare " h_n ", depășește adâncimea critică. Deoarece secțiunea canalului este dreptunghiulară, adâncimea critică se va calcula cu relația:

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gb^2}}, \quad (21.38)$$

iar debitul și viteza de acces ca la punctul 21.5.3.1.

Tabel 21.10 Prelucrarea valorilor experimentale

Nr. crt.	H (m)	V_0 (m/s)	H_0 (m)	h_i (m)					h_d (m)	Q (m ³ /s)	p_1/H	m_{ex}	m_t
				h_1	h_2	h_3	h_4	h_5					

Coeficientul de înecare se scoate din tabelul 21.5. pe baza raportului " h_n/H_0 ". Coeficientul de debit experimental, se calculează cu relația (21.5). Datele se prelucrează în tabelul 21.11, iar cu perechile de valori $Q-H_0$ se reprezintă cheia limnimetrică a deversorului în cazul curgerii înecate. Cu perechile de valori h_n/H_0 și ∂ se reprezintă și linia apei peste deversor.

Coeficientul de debit teoretic " m_t ", se calculează pe baza relației lui Berezinski corectat cu coeficientul de înecare ($m = m_0 \sigma$).

Tabel 21.11. Prelucrare valorilor experimentale

Nr. crt.	H (m)	V_0 (m/s)	H_0 (m)	h_i (m)					h_d (m)	Q (m ³ /s)
				h_1	h_2	h_3	h_4	h_5		
Nr. crt.	p_1/H	h_{av} (m)	h_{cr} (m)	h_n (m)	h_n/H_0		m_0 (21.31)	m_t		m_{ex}

LUCRAREA 22

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A COEFICIENTULUI LUI CHÉZY (C) ȘI A COEFICIENTULUI DE RUGOZITATE (n), PENTRU ALBIILE PRISMATICE

22.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Printre factorii care influențează mișcarea lichidelor în sistemele hidraulice cu nivel liber, un loc important îl ocupă rugozitatea. Rugozitatea reprezintă o caracteristică geometrică a pereților albiilor, fiind determinată de gradul de asperitate și de neregularitate a suprafețelor ce mărginesc masa de lichid.

Rugozitatea depinde de natura materialelor din care este executată albia, precum și modul lui de prelucrare. Rugozitatea canalelor executate în condiții de șantier se numește rugozitate naturală și poate fi de 2 feluri - aspră și ondulată. Albiile din pământ, canalele cu dale de beton sau din piatră au rugozitatea aspră iar canalele cu îmbrăcămînți din bitum, lemn sau beton sclivisit prezintă o rugozitate ondulată.



Fig. 22.1. Rugozitate aspră



Fig. 22.2. Rugozitate ondulată

Din diverse cauze (mărimi diverse a proeminențelor, dispunere variată etc.) rugozitatea naturală nu este susceptibilă de o exprimare matematică. Pentru aceasta s-au efectuat experiențe de laborator folosind o rugozitate artificială care poate fi definită prin mărimea particulelor sau a proeminențelor.

Deosebim:- k - rugozitate absolută - definită ca fiind diametrul granulelor de nisip folosit pentru a materializa rugozitatea;

- Δ_e (sau k_e) rugozitate absolută echivalentă.

În timpul exploatării sistemelor hidraulice închise sau deschise are loc un fenomen de modificare a rugozității absolute în timp, în sensul de mărire a

acesteia sau de micșorare. De asemenea nu există în cazul albiilor naturale și a canalelor din pământ valori suficient de precise pentru “ k ”. Din această cauză se utilizează formule empirice.

Curgerea apei în canale se încadrează în mișcarea turbulentă care este presupusă uniformă (domeniul ocupat de lichid este limitat de o suprafață prismatică, iar secțiunea nu variază în lungul curentului).

Pentru exprimarea pierderilor de sarcină în canale se folosesc formule empirice și semiempirice de tipul celor folosite la conducte pentru regimul turbulent. În practică se folosește termenul de coeficient de rugozitate, cu notația “ n ”, care intră în relația lui Chézy sau coeficientul γ_B din relația lui Bazin. Coeficientul de rugozitate “ n ” se folosește în calculul formulei lui Chézy,

$$V = C\sqrt{R_h I}, \quad (22.1)$$

în care “ C ” este coeficientul lui Chézy și are dimensiunea $[C] = L^{1/2} T^{-1}$ și unitatea de măsurare: $m^{1/2} s^{-1}$.

Formulele cele mai folosite pentru coeficientul lui Chézy sunt:

- formula Manning:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}; \quad (22.2)$$

- formula Forcheimer:

$$C = \frac{1}{n} R^{1/5}; \quad (22.3)$$

- formula Pavlovski:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (22.4)$$

$$\text{cu } y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1) \text{ pentru } R \leq 5\text{m}, \quad (22.5)$$

$$\text{sau } y = 1,5\sqrt{n} \text{ dacă } 0,1 \text{ m} \leq R < 1 \text{ m}; \quad (22.6)$$

$$y = 1,3\sqrt{n} \text{ dacă } 1 \text{ m} \leq R \leq 3 \text{ m}; \quad (22.7)$$

- formula Ganguillet-Kutter:

$$C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0,00155}{I}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{I}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \cong \frac{23 + \frac{1}{n}}{1 + \frac{23n}{\sqrt{R}}}; \quad (22.8)$$

- formula Agroskin și Kozeny:

$$C = \frac{1}{n} + 17,27 \log R; \quad (22.9)$$

- formula lui Bazin- în special pentru secțiuni vii;

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma \cdot B}{\sqrt{R \cdot h}}}. \quad (22.10)$$

În aceste formule R reprezintă raza hidraulică care rezultă din raportul secțiunii udate A și perimetrul muiat P , după relația:

$$R = \frac{A}{P}. \quad (22.11)$$

După cum s-a arătat anterior, rugozitatea se modifică în timp, fapt care duce la modificarea caracteristicilor curgerii în canale. De asemenea pentru materialele noi apare necesitatea de a se determina rugozitatea și pe cale hidraulică în afară de metodele mecanice.

22.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este determinarea în laborator, pe instalația de studiu al diferitelor tipuri de căptușeli antifiltrante (fig. 22.3), a coeficientului de rugozitate n , respectiv coeficientul lui Chézy. Se vor compara valorile experimentale cu cele oferite de literatura de specialitate.

22.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Determinarea coeficienților " n " și " C ", se efectuează pe standul de studio a diverselor tipuri de căptușeli pentru canale de irigații. Standul este compus dintr-un număr de 8 tronsoane de canal, cu lungimea de 5 m, ce au posibilitatea de reglarea pantei prin intermediul picioarelor de susținere. Secțiunea transversală canalului este trapezoidală cu posibilitatea de a se modifica înclinarea taluzului, datorită prinderii părților laterale a canalului, într-un dispozitiv balama. Alimentarea canalului se face de la rețeaua laboratorului cu ajutorul unei conducte, prevăzută cu o vană. Evacuarea se în rețeaua de canale a laboratorului, pe care se află amplasat și deversorul de măsură a debitului cu o secțiune triunghiulară. Pentru măsurarea nivelului apei pe canal s-a prevăzut la fiecare tronson câte un tub piezometric, iar pe canal se află instalate limnimeetre. Pentru ca nivelul apei pe canal să fie liniștit, respectiv

să aibă loc curgerea într-un regim permanent uniform, s-a prevăzut în baza de alimentare un dispozitiv de liniștire.

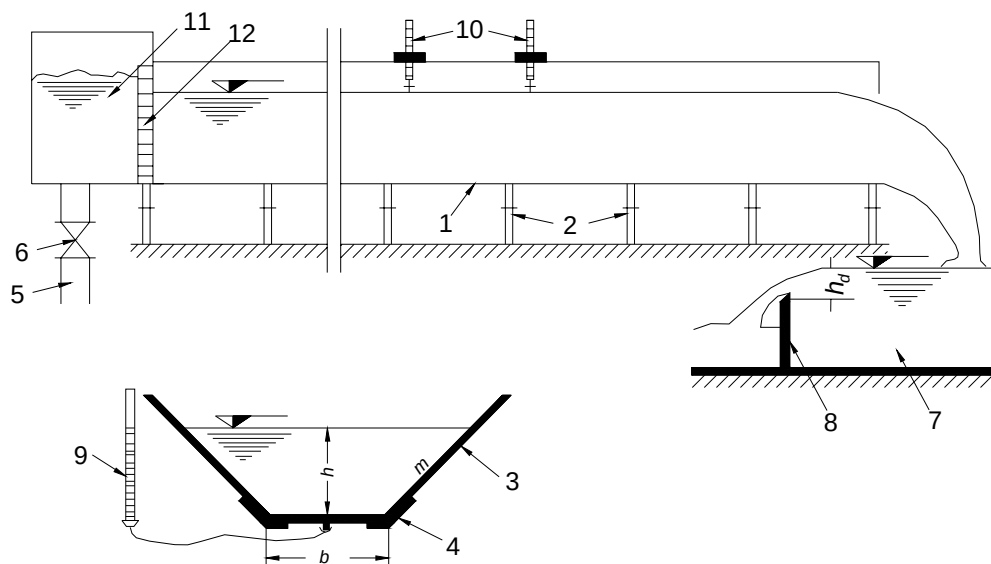


Fig. 22.3. Instalația experimentală pentru determinarea coeficienților „ C ” și „ n ” la canale

22.4. MODUL DE LUCRU

Pentru desfășurarea experimentărilor se parcurg următoarele operații:

- se măsoară elementele geometrice ale secțiunii canalului lățimea la fund „ b ” coeficientul unghiular al taluzului „ m ” și panta canalului I ;
- se măsoară cota „0” a deversorului triunghiular;
- se pornește instalația de pompare ce alimentează canalul și se deschide vana;
- după instalarea unui regim permanent uniform de curgere pe canal, se citesc la tuburile piezometrice, sau la acele de măsură (limnimetre), valorile înălțimilor de apă „ h_i ”; citirea se va face pe tronsoanele 3, 4 și 5 ale canalului, pentru a se exclude influența zonei de alimentare și cea de evacuare în care mișcarea poate trece într-un regim gradual variat;
- concomitent cu citirea valorilor „ h_i ” se măsoară nivelul la deversorul de măsură a debitului „ h_d ”;
- se modifică debitul canalului prin deschiderea sau închiderea vanei (6); experimentările vor începe de la valori mici ale nivelului pe canal, urcând până la valoarea maximă și apoi în sens invers;

- după instalarea regimului de curgere uniform pe canal la noua valoare a nivelului, se efectuează citirile la dispozitivele de măsură a nivelului și a debitului;
- la terminarea experimentărilor se închide vana, după care se oprește stația de pompare;
- experimentările se fac pentru circa 10-15 înălțimi de apă pe canal.

22.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Coeficientul lui Chézy rezultă din ecuația debitului pentru mișcarea permanent uniformă pe canale:

$$Q = AC\sqrt{RI}, \quad (22.12)$$

în care: Q este debitul;

A - secțiunea canalului;

R - raza hidraulică;

I - panta canalului;

C - coeficientul Chézy.

Secțiunea udată a canalului este definită de relația:

$$A = h(b + mh), \quad (22.13)$$

în care : h este înălțimea apei;

b - lățimea la fund;

m - coeficientul unghiular al taluzului.

Raza hidraulică este dată de relația (23.11), respectiv $R = A/P$ cu P :

$$P = b + 2h\sqrt{1 + m^2}. \quad (22.14)$$

Coeficientul de rugozitate “ n ” rezultă din relația (22.2) în care se introduc valorile coeficientului Chézy și razei hidraulice corespunzătoare calculată anterior.

Calculul debitului se face cu relația:

$$Q = Mh_d^{5/2}(m^3 / s), \quad (22.15)$$

în care M este coeficientul de debit al deversorului triunghiular;

h_d - înălțimea de apă măsurată pe deversor.

Pentru calculul coeficientului lui Chézy se folosește valoarea celor trei înălțimi de apă măsurate pe canal. Valorile coeficientului de rugozitate obținut se prelucurează statistic, determinându-se valoarea cea mai probabilă. Calculele se trec în următorul tabelul 22.1.

Nr.crt	$h(m)$				A (m^2)	P (m)	R (m)	h_d (m)	Q (m^3/s)	C ($m^{1/2}/s$)	n
	h_1	h_2	h_3	h_{med}							

LUCRAREA 23

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A DISTRIBUȚIEI VITEZEI ÎN ALBII PRISMATICE. DETERMINAREA DEBITULUI PRIN INTEGRAREA EPURII VITEZEI

23.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Cunoașterea distribuției vitezelor într-o secțiune transversală a albiilor prismatice precum și ale vitezelor medii condiționează proiectarea și exploatarea acestor albi. În practica curentă, cunoașterea vitezei în albi prismatice permite stabilirea regimurilor de funcționare, stabilirea unor caracteristici privind vitezele admisibile, stabilirea debitelor etc.

Într-o secțiune transversală a unei albi prismatice vitezele locale au o variație funcție de adâncime, forma secțiunii transversale și rugozitatea pereților.

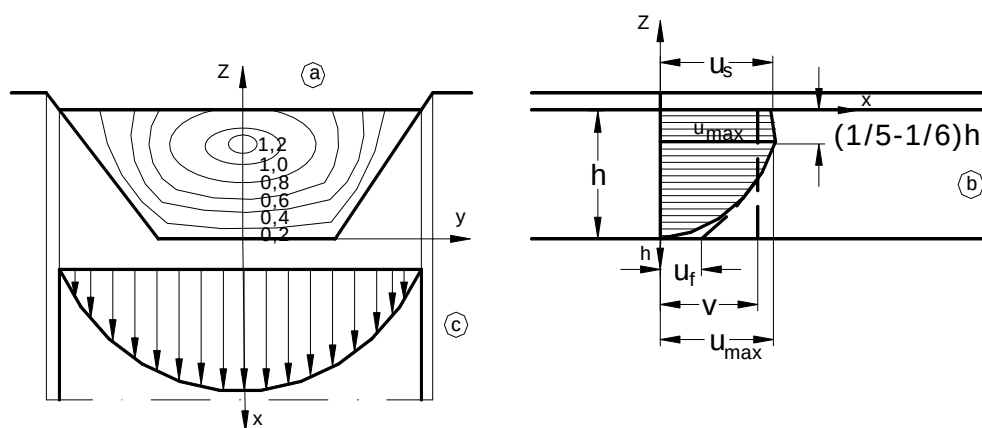


Fig. 23.1. Distribuția vitezelor în raport cu adâncimea în secțiunea longitudinală ale unei albi prismatice

Variația vitezei în raport cu adâncimea h este o lege logaritmică, gradient mare de viteză se găsește lângă contur, fapt datorat frecărilor. Distribuția vitezelor sub această formă este rezultatul frecărilor între particulele lichide și între lichid și pereți, respectiv aer. Rezistențele de frecare fiind

aproape uniform distribuite, curbele izotahe (de egală viteză) urmează conturul albiei în afară de colțuri unde se depărtează de acestea.

În diverse puncte al secțiunii transversale unei albiei prismatice, se poate vorbi de viteze punctuale instantanee, pulsații de viteză, viteze medii locale. Aceste mărimi pot fi puse în evidență cu ajutorul diferitelor instrumente și metode de măsurare.

Vitezele punctuale instantanee și pulsațiile de viteză au importanță în activitatea de cercetare științifică și cer instrumente și metode de măsurare perfecționate, foarte sensibile.

Vitezele medii locale se pot determina relativ mai ușor și prezintă o importanță practică deosebită. Metodele și aparatele pentru măsurarea vitezelor medii locale sunt mult diversificate și perfecționate. Prin cunoașterea vitezelor medii locale se pot determina vitezele medii pe secțiune.

23.1.1. Măsurarea vitezelor medii locale

Măsurarea vitezelor medii locale se poate face cu diferite aparate:

a. Flotoarele sunt cele mai simple instrumente pentru determinarea vitezelor medii locale ele pot măsura viteza de suprafață sau de viteză la o anumită adâncime. Metoda constă în măsurarea parcurgerii de flotor al unei distanțe L , în timpul t , iar viteza este $v = L/t$.

Între viteza de suprafață și viteza medie există corelația:

$$V_{med} = aV_s \quad (24.1)$$

unde: a este un coeficient care are valori, $a \in (0,7; 0,9)$, $a \cong 0,85$;

V - viteza de suprafață.

b. Tubul Pitot Prandtl se folosește la determinarea vitezelor medii locale, măsurând la un manometru diferențial termenul cinetic $h = V^2/2g$. Metoda și instrumentul se poate folosi în cazul vitezelor mari; la vitezele mici erorile relative fiind considerabile (termenul cinetic este foarte mic).

c. Morișca hidrometrică este aparatul cel mai folosit în determinarea vitezelor medii locale. Prin robustețe și precizie (2-5 %), asigură condiții bune de măsurare. Morișca transformă mișcarea de translație în mișcare de rotație, iar turația rotorului este proporțională cu viteza medie locală:

$$V = an + b. \quad (24.2)$$

Stabilirea ecuației caracteristice sau a curbei (v, n) se stabilește prin etalonarea moriștii.

Funcție de forma paletelor, diametrul rotorului, felul semnalelor și contorizarea lor moriștile pot fi de tipul: Price, Ctt, Jestovski, Burțev, I.M.H. etc. Moriștile obișnuite au diametrul rotorului 3.8 – 14 cm iar micromoriștile au diametre de 0.8-1.5 cm.

23.1.2. Determinarea debitelor în albiei prismatice

Debitul lichid în albiei prismatice poate fi determinat prin metode indirecte și metode directe.

23.1.2.1. Metodele indirecte de determinare a debitelor se bazează pe integrarea câmpului de viteză în secțiunea transversală a albiei (fig. 23.2).

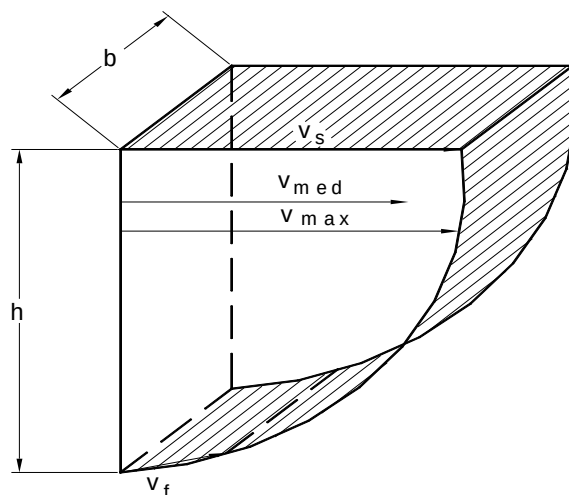


Fig. 23.2. Schema de calcul a debitului prin integrarea epurii vitezelor. Fragmente de calcul

a. Metoda fragmentelor.

Fragmentele de lățimea b_i , lățimea h_i și v_{med} transportă debitul elementar ΔQ_i :

$$\Delta Q_i = v_{med} \cdot h_i \cdot b_i. \quad (23.3)$$

Debitul total transportat de albie este suma debitelor elementare:

$$Q = \sum_l^n Q_i = \sum_l^n v_{med} \cdot h_i \cdot b_i. \quad (23.4)$$

În cazul unor lățimi infinit mici db , debitul este:

$$Q = \int_0^B v_i \cdot h \cdot d \cdot b. \quad (23.5)$$

b. Metoda izotahelor presupune tot integrarea câmpului de viteză dar nu pe fragmente verticale, ci între izotahe. Debitul total este suma debitelor elementare:

$$Q = \sum a_{i,i+l} \frac{v_i + v_{i+l}}{2}, \quad (23.6)$$

în care: Q este debitul;

$a_{i,i+l}$ - suprafața cuprinsă între izotahele v_i v_{i+l} ;

v_i, v_{i+l} - valoarea izotahelor de calcul, care mărginesc suprafața a_i .

23.1.2.2. Metode directe de determinare a debitelor sunt: metoda indicatorilor (diluției) și metode bazate pe fenomene hidraulice.

a. Metoda indicatorilor

Procedeul constă în introducerea într-o secțiune transversală a albiei a unui indicator (chimic, colorimetric, radiometric) și detectarea concentrației indicatorului într-o secțiune situate în aval, suficient de departe pentru a fi realizat amestecul complet între indicator și apa din albie.

Dacă q este debitul constant al soluției de indicator cu concentrația C_1 , Q – debitul râului cu concentrația inițială C_0 (concentrația naturală) și C_2 concentrația amestecului într-o secțiune aval, aplicând ecuația de diluție se obține:

$$QC_0 + qC_1 = (Q + q)C_2, \quad (23.7)$$

sau

$$Q = q \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0}. \quad (23.8)$$

Dacă $C_2 \ll C_1$ și $C_0 \ll C_2$ atunci:

$$Q = q \frac{C_1}{C_2}. \quad (23.9)$$

Aceasta metodă se poate aplica la debitele $Q \leq 50 \text{ m}^3/\text{s}$.

b. Metode bazate pe fenomene hidraulice în albie

Dintre aceste metode se amintesc:

- metoda strangulării secțiunii – debitmetre Parshal, Venturi, De Marchi, ISCH;
- deversoare;
- construcții hidrotehnice tarate.

23.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este determinarea distribuției vitezelor într-o secțiune transversală ale unei albie prismatice, trasarea izotahelor și calculul debitului pe baza epurii vitezei și compararea acestuia cu debitul determinat pe cale directă.

23.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Distribuția vitezelor se va determina în secțiunea transversală a canalului vitrat al laboratorului (1)- fig. 23.3.

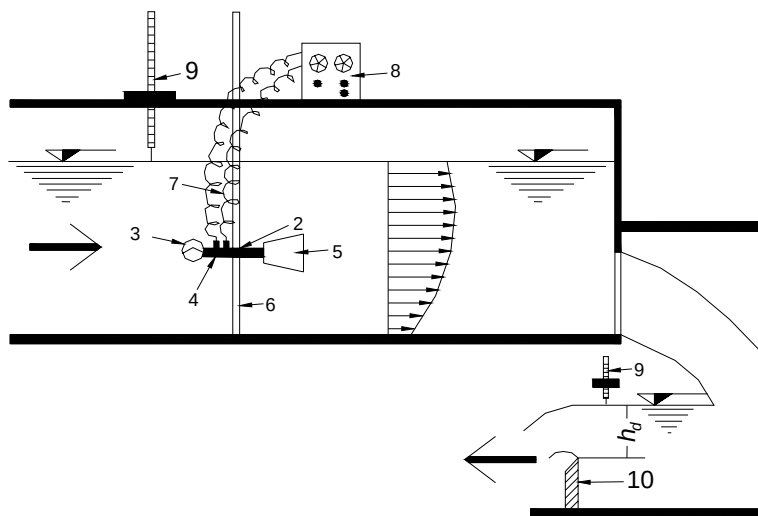


Fig. 23.3. Instalația experimentală

Pe acest canal, cu secțiune dreptunghiulară se montează morișcă hidrometrică (2), compusă din elementele: rotor (paletă) (3), corp (4), ampenaj de direcție (5), tijă (6), cablu electric de legătură (7), numărator de impulsuri (8).

Adâncimea apei în canal și sarcina pe deversor se măsoară cu limnimetre cu ac (9). Pe canalul de recirculare este prevăzut un deversor (10) pentru măsurarea debitului.

23.4. MODUL DE LUCRU

Prin manevrarea vanei de alimentare a canalului vitrat se stabilește pe acesta o înălțime de apă circa 40 cm. Lățimea canalului fiind de 50 cm, secțiunea transversală a curentului (40 x 50) se va împărți în fâșii orizontale și verticale așa fel încât să rezulte un caroiaj aproximativ pătratic (4 fâșii orizontale și 5 verticale). În centrul de greutate al fiecărei suprafețe elementare se măsoară viteza cu morișca hidrometrică tip Burțev (fig.23.4).

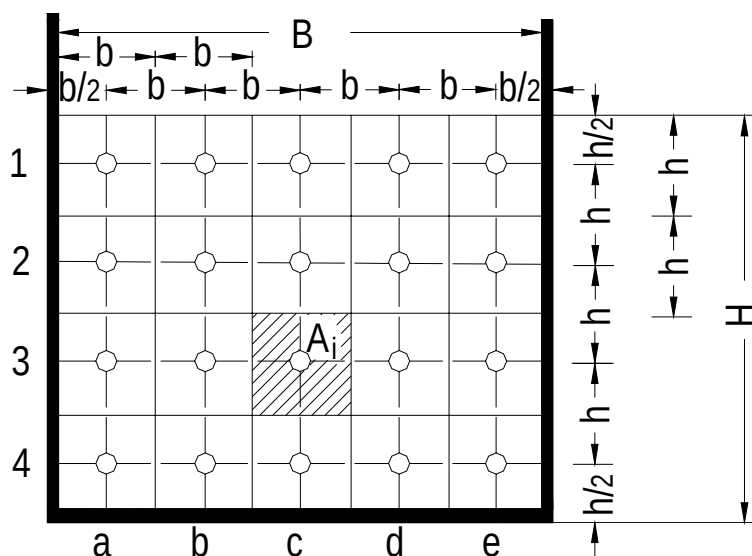


Fig. 23.4. Împărțirea secțiunii de curgere în suprafețele elementare

Concomitent cu măsurătorile de viteză se va determina debitul pe deversorul triunghiular.

În timpul măsurătorilor atenție trebuie acordată menținerii mișcării permanente și uniforme în canal.

Timpul de măsurare cu morișca într-un punct trebuie să fie mai mare de 80 secunde și să coincidă cu un număr par de semnale ale moriștii. În fiecare punct se vor face cel puțin două repetiții ale măsurătorilor de viteză. Rezultatele măsurătorilor experimentale se centralizează în tabelul 23.1

LUCRAREA 24

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR CURBEI DE REMUU LA IEȘIREA UNUI CURENT DE SUB O STAVILĂ

24.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Mișcarea lichidelor în sisteme cu suprafață liberă poate fi clasificată după variația în timp a mărimilor ce caracterizează mișcarea în:

- mișcări permanente;
- mișcări nepermanente.

Sub aspectul *variației în spațiu* a mărimilor ce caracterizează mișcarea există:

- mișcări uniforme - liniile de curent sunt drepte și paralele;
- mișcări neuniforme - liniile de curent nu sunt drepte paralele între ele.

Din punct de vedere tehnic în rețeaua de canale predomină mișcările neuniforme care se clasifică și ele după curbura liniilor de curent în:

- mișcări gradual variate – liniile de curent au o curbura relativ mică ce se manifestă pe o lungime mare (curbele de remuu);
- mișcări rapid variate – liniile de curent prezintă o curbura accentuată pe o lungime mică (saltul hidraulic).

Mișcarea gradual variată prezintă în lungul curentului valori diverse pentru înălțimea de apă “ h ”, datorită unor factori printre care se pot enumera:

- schimbări ale secțiunii transversale a curentului sau a pantei fundului canalului sau albiei naturale;
- lucrări hidrotehnice în albie(deversoare, praguri de fund, stăvilare, baraje etc.).

În tehnică interesează în principal curba suprafeței libere, care este și linia piezometrică a curentului. Ecuația diferențială fundamentală a mișcării permanente și gradual variate într-un canal este:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2(h)}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{g} \frac{B(h)}{A^3(h)}}, \quad (24.1)$$

sau pentru un canal cu albie prismatică:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - j}{1 - Fr^2}. \quad (24.2)$$

Ecuatia (24.2) descrie formele suprafeței libere a curentului iar tipurile curbelor rezultă din analiza calitativă a acestei ecuații. Tipul curbei de remuu depinde de următorii parametri:

- panta canalului care poate fi $i < 0$, determinând tipul mișcării, respectiv lent sau rapid;
- raportul dintre panta canalului și panta critică $i < i_{cr}$;
- raportul dintre adâncimea normală a apei în mișcarea uniformă h_0 și cea realizată în mișcarea gradual variată h .

Notăția tipurilor de curbă de remuu se poate face cu litere mici (a, b, c) funcție de zonele în care apar, zone ce sunt delimitate de 2 linii caracteristice $N-N$ și $C-C$. Linia $N-N$ reprezintă linia adâncimilor normale, iar linia $C-C$ linia adâncimilor critice.

Calculul curbelor suprafeței libere, respectiv integrarea ecuației (24.2) pentru diverse secțiuni de canale se poate face prin mai multe metode:

- metoda Bresse - pentru albie de secțiune dreptunghiulară (mișcare plană);
- metoda Bahmetev – pentru albie de formă oarecare;
- metoda diferențelor finite – pentru albie neprismatice.

Metoda Bahmetev, foarte des utilizată pentru calculul curbelor de remuu în albie prismatice, se bazează pe următoarele ipoteze:

- exponentul hidraulic nu depinde de adâncimea curentului;
- se introduce mărimea, j cu valoare medie pe sectorul de calcul considerat,

$$j = \frac{\alpha C_m^2 B_m}{g P_m}, \quad (24.4)$$

în care: i este panta fundului albiei;

C_m - coeficientul lui Chézy, ca medie pe sector;

B_m - lățimea la gaura a albiei, ca medie pe sector;

P_m - perimetrul udat, ca medie pe sector.

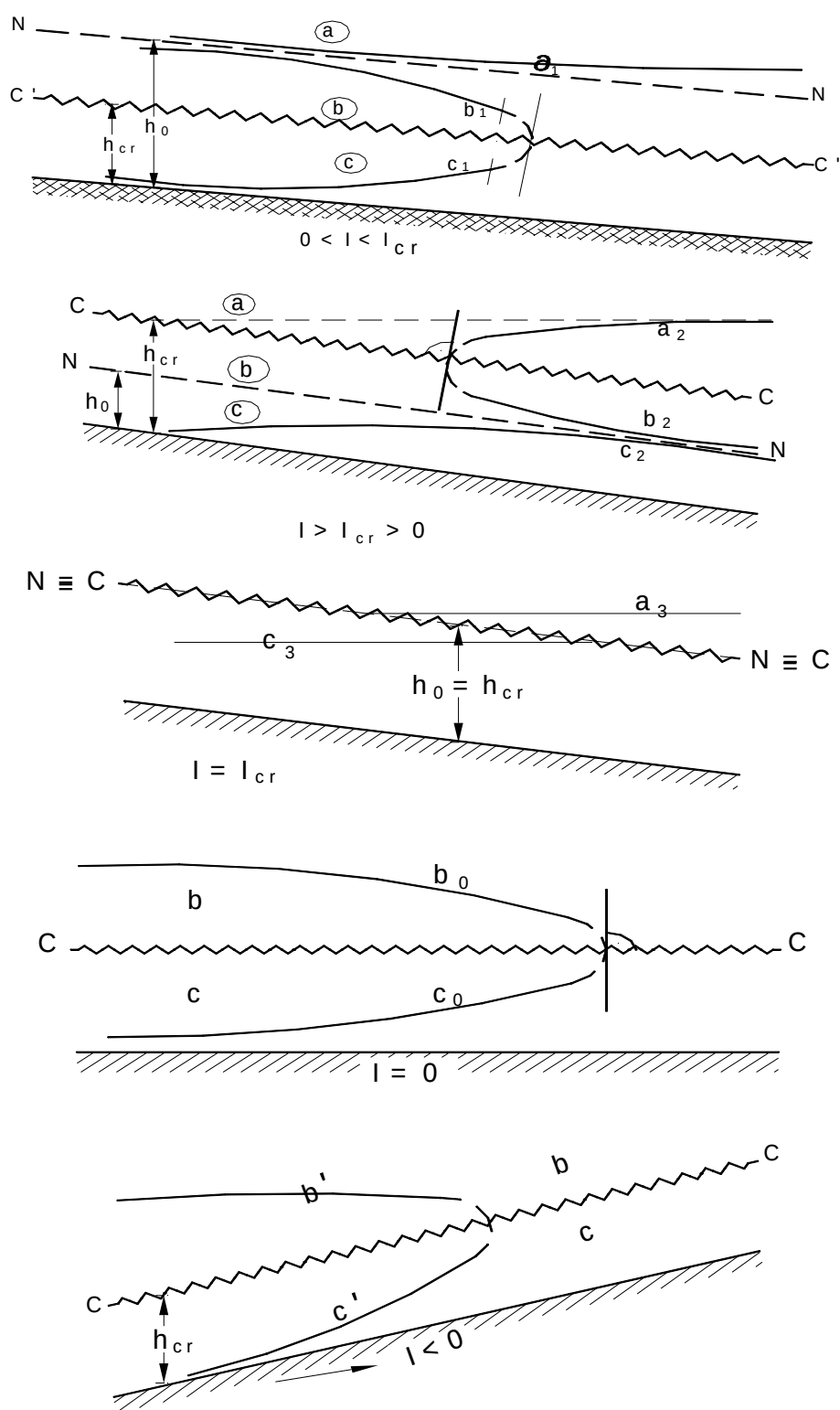


Fig. 24.1. Formele caracteristice ale curbelor suprafețelor libere în canale prismatice

Cu aceste ipoteze pentru canale cu panta $i > 0$, și cu notația η , numită adâncime relativă și dată de relația:

$$\eta = \frac{h}{h_c}, \quad (24.5)$$

ecuația (25.2) devine:

$$\frac{ids}{h_0} = d\eta + (1 - \bar{j}) \frac{d\eta}{\eta^x - 1}. \quad (24.6)$$

Ecuația (24.6) integrată cu notațiile respective celor trei tipuri de pantă $i \gtrless 0$, prezintă următoarele forme:

- cazul $i > 0$:

$$\frac{il}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 - (1 - \bar{j}) [\varphi(\eta_2) - \varphi(\eta_1)]; \quad (24.7)$$

- cazul $i = 0$:

$$\frac{i_{cr} l}{h_{cr}} = \bar{j}_{cr} (\xi_2 - \xi_1) - [\varphi(\xi_2) - \varphi(\xi_1)]; \quad (24.8)$$

- cazul $i < 0$:

$$\frac{i' l}{h_0} = -(\zeta_2 - \zeta_1) + (1 + \bar{j}) [\varphi(\zeta_2) - \varphi(\zeta_1)]. \quad (24.9)$$

Valorile funcțiilor $\varphi(\eta)$, $\varphi(\xi)$ și $\varphi(\zeta)$ se scot din tabele pentru exponentul hidraulic al albiei "x" calculate cu următoarele formule:

- pentru o albie oarecare între două puncte cu adâncimile h_1 și h_2 :

$$x = 2 \frac{\log(K_2 / K_1)}{\log(h_2 / h_1)}; \quad (24.10)$$

- pentru albie cu secțiune transversală trapezoidală:

$$x = (3 + 2y) \left(1 + \frac{m}{\beta + m}\right) - (1 + 2y) \frac{2\sqrt{1 + m^2}}{\beta + 2\sqrt{1 + m^2}}, \quad (24.11)$$

în care x este exponentul hidraulic:

$$\beta = b/h;$$

$y = 1/6$ – exponentul din formula lui Manning;

$m = \text{ctg } \alpha$ - coeficientul unghiular al taluzului;

- pentru albie cu secțiune transversală dreptunghiulară:

$$x = 3,31 - \frac{2,66}{\beta + 2}; \quad (24.12)$$

- pentru albie cu secțiune transversal triunghiulară:

$$x = 5,3. \quad (24.13)$$

Principalele probleme de calcul în mișcarea gradual variată sunt următoarele:

- calculul lungimii curbei de remuu ” l ” cunoscându-se cotele ” h_1 ” și ” h_2 ” ale apei în secțiunile de control (exemplu - lungimea de influență prin ridicarea nivelului pe un canal în cazul amplasării unui deversor);

- determinarea unei adâncimi $h_1(h_2)$ când se cunoaște lungimea ” l ” și cealaltă adâncime $h_2(h_1)$ (exemplu – în cazul amplasării unor construcții hidrotehnice în albia unui canal trebuie să se cunoască cota nivelului apei la diverse distanțe pentru a se preveni inundarea sau deversarea apei peste coronamentul canalului);

- determinarea debitului Q în situația cunoașterii lungimii ” l ” și adâncimilor curbei h_1 și h_2 .

24.2. SCOPUL LUCRĂRII

În laborator pe canalul vitrat se vor determina parametrii hidraulici pentru o curbă de remuu de tip ” C ” formată la ieșirea unui curent de apă pe sub un stăvilar. Se vor compara valorile experimentale cu cele calculate teoretic.

24.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pe canalul vitrat (1) al laboratorului (fig. 24.2) se montează un stăvilar (2), cu deschiderea ” a ”. Canalul vitrat este alimentat de la stația de pompare a laboratorului prin intermediul unei conducte (3), pe care este montată o vană (4). Evacuarea se face în centura de canale ale laboratorului (5) pe care se află montat și deversorul de măsură triunghiular (6) pentru determinarea debitelor.

În partea finală a canalului vitrat este prevăzută o stavilă articulată (7) cu ajutorul căreia se pot modifica înălțimile de apă în zona aval. Măsurarea adâncimilor de apă se face cu ajutorul unor limnimetre (ace de măsură) (8). Pentru determinarea pantei canalului s-a prevăzut în capătul amonte al canalului, un dispozitiv de măsurare (9) a valorii Δh care raportate la lungimea de influență are ca rezultat panta. În partea amonte a canalului se află un dispozitiv de liniștire a nivelului (10).

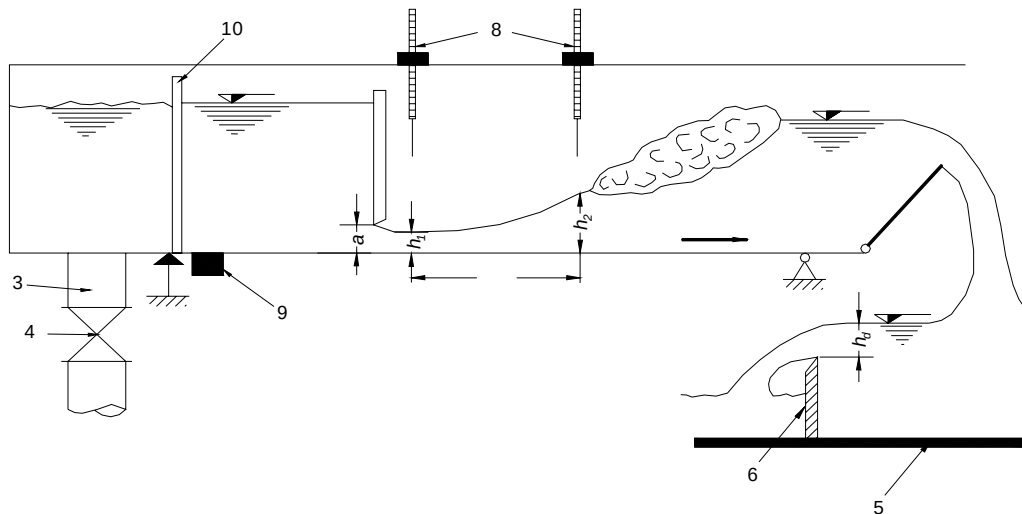


Fig. 24.2. Instalația experimentală

24.4. MODUL DE LUCRU

Ordinea operațiunilor necesare efectuării lucrării este următoarea:

- se măsoară elementele geometrice ale canalului (b , Δh , L) și elementele necesare pentru măsurarea debitului și nivelului apei (cotele "O" ale deversorului și acele de măsură montate pe canal);
- se deschide vana (4) astfel ca nivelul apei să nu treacă peste stăvilarul montat pe canal, curgerea având loc pe sub acesta;
- se măsoară parametrii curbei de remuu ce s-a format prin ieșirea curentului de apă sub stăvilar respectiv h_1, h_2, l și totodată înălțimea apei pe deversorul de măsură a debitului h_d ;
- operațiile se repetă pentru alt debit, obținut pe canal, prin manevrarea vanei (4) de pe conducta de alimentare;
- la terminarea experimentărilor se închide vana (4) și se oprește stația de pompare.

24.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Debitul de apă pe canal se calculează cu relația:

$$Q = M h_d^{5/2}, \quad (24.14)$$

în care: Q este debitul pe canal în (m^3/s)

M este coeficientul de debit – $M = 1.38$;

h_d este înălțimea de apă pe deversor (m).

Adâncimea normală h_0 se calculează cu relația din literatura de specialitate pentru elementele geometrice ale canalului măsurate (rugozitatea canalului $n = 0.009$) și debitul determinat anterior.

Adâncimea critică în canal se calculează cu relația:

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot b^2}}. \quad (24.15)$$

Cunoscând adâncimea critică se poate calcula panta critică a canalului:

$$I_{cr} = \frac{Q^2}{A_{cr}^2 C_{cr}^2 R_{cr}} \quad (24.16)$$

în care: I_{cr} este panta critică;

A_{cr} - secțiunea corespunzătoare adâncimii critice;

C_{cr} - coeficientul lui Chézy pentru adâncimea critică;

R_{cr} - raza hidraulică corespunzătoare adâncimii critice.

Comparând valorile calculate h_{cr}, h_0, i, i_{cr} conform schemei de mai jos se determină tipul de curbă de remuu:

a. $i < i_{cr}; h < h_{cr}; h_{cr} < h_0$ - rezultă o curbă de tip c_1 (24.17);

b. $i > i_{cr}; h > h_{cr}; h_{cr} > h_0$ - rezultă o curbă de tip c_2 (24.18).

Cunoscând tipul de curbă de remuu se determină lungimea ei pe baza valorilor celor două adâncimi măsurate la începutul curbei și la sfârșitul ei, precum și a debitului Q . Ordinea calculelor este următoarea:

- calculul adâncimii medii " h_m " pe sectorul de lungime " l ", pentru care va corespunde A_m, P_m, R_m, C_m, B_m , valori cu care se calculează mărimea j ;

- calculul exponentul hidraulic al albiei " x ", cu una din relațiile indicate anterior;

- calculul adâncimilor relative " η_1, η_2 " cu ajutorul relațiilor:

$$\eta_1 = \frac{h_1}{h_c} \text{ și } \eta_2 = \frac{h_2}{h_0}; \quad (24.19)$$

- cu valorile adâncimilor relative " η_1 " și " η_2 ", din tabele de calcul a funcțiilor " $\varphi(\eta)$ ", în coloana corespunzătoare " x ", se obțin valorile " $\varphi(\eta_1)$ " și " $\varphi(\eta_2)$ "; în situația că valoarea exponentului hidraulic sau a adâncimilor relative nu este egală cu una din tabel, se interpolează liniar între coloane pentru " x " sau între linii pentru " $\varphi(\eta)$ ";

- cu valorile obținute $\eta_2, \eta_1, \varphi(\eta_2), \varphi(\eta_1), h_0, \bar{j}, i$ se calculează lungimea curbei de remuu “ l_{calc} ”;
- se compară valoarea lungimii măsurată, cu valoarea lungimii calculate prin eroarea absolută;
- se trasează pe hârtie milimetrică curba suprafeței libere obținută prin măsurarea în cel puțin 5 puncte a adâncimii apei la distanța l_i ($\sum l_1 = l_{\text{mas}}$).

LUCRAREA 25

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR SALTULUI HIDRAULIC

25.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Saltul hidraulic este fenomenul de discontinuitate a suprafeței libere a unui curent, la trecerea de la regimul rapid la regimul lent de mișcare. El se caracterizează printr-o înclinare relativ mare a suprafeței libere a curentului între adâncimea $h' < h_{cr}$ și $h'' > h_{cr}$, trecerea realizându-se pe o distanță foarte scurtă. Saltul reprezintă forma de trecere a curentului prin adâncimea critică, căreia îi corespunde o transformare a unei părți a energiei cinetice în energie potențială, însoțită și de o pierdere de energie. Energia specifică totală înaintea saltului este mai mare ca cea după salt, $H_1 > H_2$, diferența $H_1 - H_2 = H_S$, reprezintă pierderea de energie specifică totală prin salt.

Elementele caracteristice a saltului hidraulic sunt:

- adâncimile curentului între care se formează saltul h_1 și h_2 ; numite și adâncimi conjugate;
- diferența de nivel, $h'' - h' = d$ (înălțimea saltului);
- lungimea saltului, l .

25.1.1. Tipurile de salt

În funcție de condițiile în care se produce, saltul poate fi de diferite tipuri (fig. 25.1):

- salt ondulat (fig. 25.1.a.), pentru $l < Fr' < 3$, ($Fr' = V_1^2 / gh'$);
- salt incipient (fig. 25.1.b.), pentru $Fr' = 3...6$;
- salt cu jet oscilant (fig. 25.1.c.), pentru $Fr' = 6...20$;
- salt perfect (fig. 25.1.d.), pentru $Fr' = 20...80$;
- salt violent (fig. 25.1.e.), pentru $Fr' > 80$.

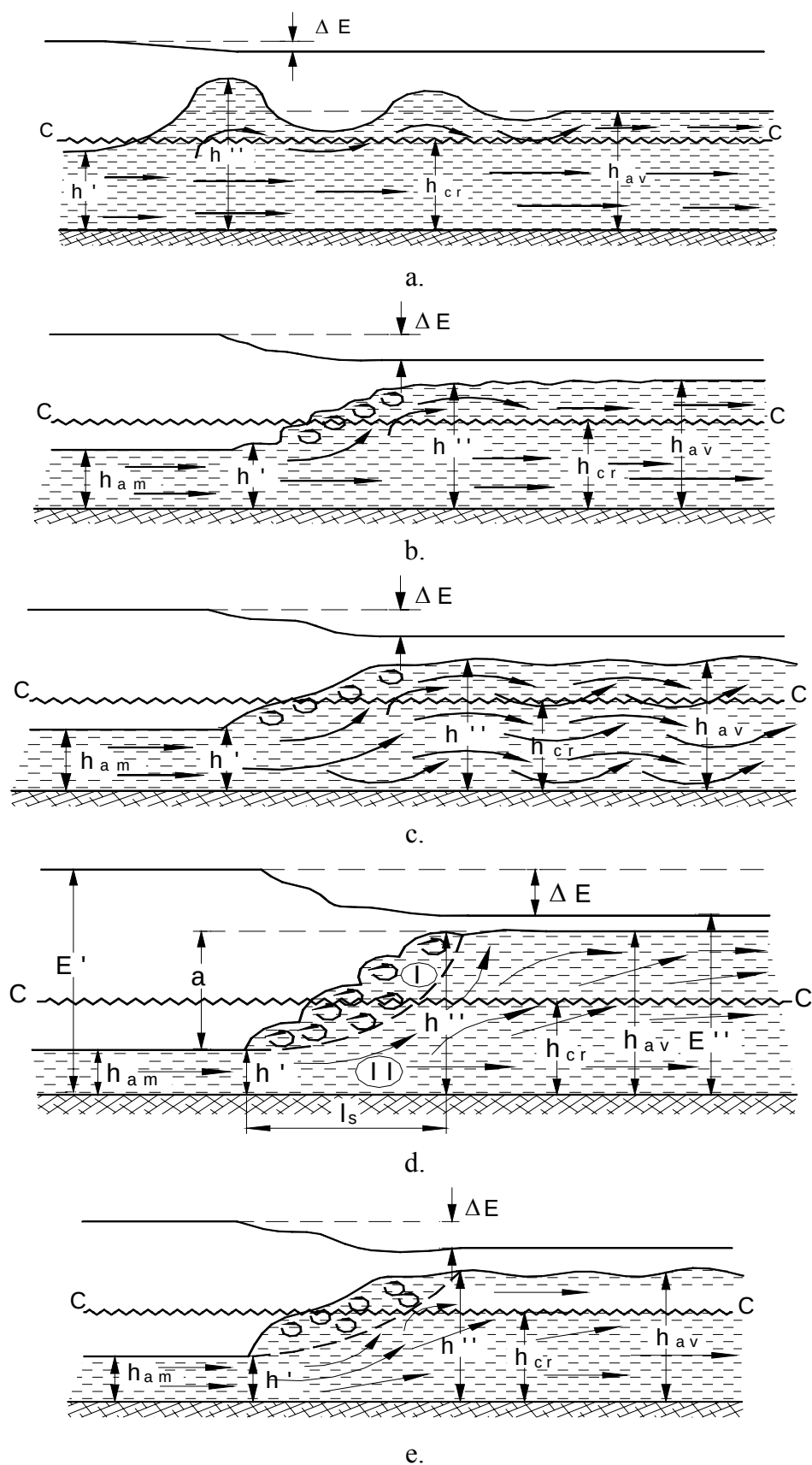


Fig. 25.1. Forme caracteristice ale saltului hidraulic funcție de numărul Fr'

25.1.2. Funcția saltului

Aplicând teorema impulsului masei de fluid cuprinsă în suprafața de control care delimitează saltul, se obține:

$$\frac{\alpha Q^2}{gA'} + y' A' = \frac{\alpha Q^2}{gA''} + y'' A'' \quad (25.1)$$

în care: Q este debitul;

- A' și A'' - ariile secțiunilor transversale la extremitățile saltului;

- y' și y'' - adâncimile centrelor de greutate ale secțiunilor;

α - coeficientul de corecție pentru cantitatea de mișcare exprimată cu ajutorul vitezei medii ($\alpha = 1.03 - 1.05$).

Expresia:

$$\theta(H) = \frac{\alpha \cdot Q^2}{g \cdot A} + y \cdot A \quad (25.2)$$

poartă numele de funcția saltului și are aceeași valoare pentru adâncimile conjugate: $\theta(h') = \theta(h'')$.

Într-un canal prismatic se poate scrie, înlocuind $A = Bh$, $y = h/B$, $Q = qB$, ecuația saltului:

$$h' h'' (h' + h'') = 2h_{cr}^3 \quad (25.3)$$

25.1.3. Calculul adâncimilor conjugate

Pentru un canal de secțiune dreptunghiulară determinarea adâncimilor conjugate se reduce la rezolvarea ecuației (25.3).

Soluțiile sunt următoarele:

$$h' = \frac{h''}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{cr}}{h''} \right)^3} - 1 \right], \quad (25.4)$$

$$h'' = \frac{h'}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{cr}}{h'} \right)^3} - 1 \right], \quad (25.5)$$

sau

$$h' = \frac{h''}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8q^2}{g(h'')^3}} - 1 \right] \quad \text{și} \quad h'' = \frac{h'}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8q^2}{g(h')^3}} - 1 \right], \quad (25.6)$$

iar adâncimea critică se calculează cu relația:

$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha \cdot q^2}{g}}. \quad (25.7)$$

Pentru înălțimea saltului simplu se utilizează formula:

$$d = h'' - h'. \quad (25.8)$$

Pentru albiile având altă formă decât cea dreptunghiulară calculul adâncimilor conjugate se poate conduce grafo-analitic utilizând curba de variație a funcției saltului, sau prin metode numerice.

25.1.4. Lungimea saltului

Prin lungimea saltului se înțelege în general proiecția pe orizontală a lungimii zonei de vârtejuri de la partea superioară a saltului. Determinarea lungimii are o mare importanță pentru practică, deoarece determină în mod direct lungimea de consolidare a albiei în bieful aval. Pentru albiile dreptunghiulare lungimea saltului este dată de relațiile:

$$l_s = 6(h'' - h') \quad (25.9)$$

- relația lui Safranez:

$$l_s = 4,33h''; \quad (25.10)$$

- relațiile lui Pavlovski:

$$l_s = 2,5(1,9h'' - h'), \quad (25.11)$$

$$l_s = \frac{1}{2}[4,5h'' + 5(h'' - h')]; \quad (25.12)$$

- relația lui Iamandi:

$$l_s = 6,52(h'' - h')(\log Fr')^{-0.43}; \quad (25.13)$$

- relația lui Certousov:

$$l_s = 10,3h'(\sqrt{Fr'} - 1)^{0.81}. \quad (25.14)$$

Exceptând formula lui Pavlovski, celelalte sunt valabile pentru $Fr' > 4$. În cazul saltului ondulat se pot folosi aceleași formule dar cu mai puțină siguranță.

Pentru albiile cu secțiune transversală trapezoidală se poate folosi formula lui Posey și Hsing (în calculele preliminare):

$$l_s = 5h'' \left(1 + 4\sqrt{\frac{B'' - B'}{B'}} \right), \quad (25.15)$$

în care B' și B'' sunt lățimile curentului la nivelul suprafeței libere.

25.1.5. Pierderea de energie în salt și puterea disipată

Pierderea de energie în salt, ΔE , rezultă din ecuația energiei scrisă pentru secțiunile 1 și 2, la extremitățile saltului:

$$\Delta E = E' - E'' = \left(h' + \frac{\alpha (v')^2}{2g} \right) - \left(h'' + \frac{\alpha \cdot (v'')^2}{2g} \right), \quad (25.16)$$

care pentru secțiunea dreptunghiulară devine:

$$\Delta E = \frac{(h'' - h')^3}{4h'h''}. \quad (25.17)$$

Puterea disipată este:

$$\Delta P = Q \Delta E. \quad (25.18)$$

25.2. SCOPUL LUCRĂRII

Pe canalul vitrat se vor studia parametrii unui salt hidraulic ce se formează la ieșirea apei pe sub o vană cu deschiderea “ a ”. Valorile măsurate se vor compara cu cele calculate cu relațiile date de literatura de specialitate.

25.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pe canalul vitrat al laboratorului (fig. 25.2) se montează un stăvilă plan cu deschiderea “ a ” (5 – 10 cm). Canalul este alimentat de la stația de pompare prin intermediul unei conducte pe care se află montată o vană. evacuarea se face la centura de canale a laboratorului pe care se află montat deversorul de măsura triunghiular. Înălțimea de apă pe canal cât și la deversor se măsoară cu limnimetre. În partea finală a canalului vitrat se află montată o stavilă articulată care permite reglarea nivelului apei din aval.

25.4. MODUL DE LUCRU

Pentru efectuarea experimentului sunt necesare următoarele operații:

- se măsoară elementele geometrice ale canalului - lățimea la fund, deschiderea stăvilărilor, cotele zero ale punctelor de măsurare;
- se măsoară cota “0” a deversorului de măsura dreptunghiular;

- se pornește stația de pompare și se deschide vana de pe conducta de alimentare a canalului, urmărind realizarea unei înălțimi de apă în spatele stăvilărilor care să se mențină constantă;
- în momentul în care înălțimea de apă din spatele stăvilărilor se menține constantă, se măsoară elementele saltului format prin ieșirea curentului pe sub stăvilă - adâncimile conjugate h_1 și h_2 și lungimea l_s ;
- concomitent cu măsurarea elementelor saltului se măsoară și sarcina " h_c " pe deversorul de măsura triunghiular, necesar pentru calculul debitului pe canal;
- se modifică debitul de pe canal cu ajutorul vanei prin deschiderea sau închiderea acesteia și se reiau operațiile menționate anterior;
- determinările se fac pentru un număr de 3 – 5 salturi hidraulice produse pe canal prin ieșirea curentului de apă pe sub stăvilă.

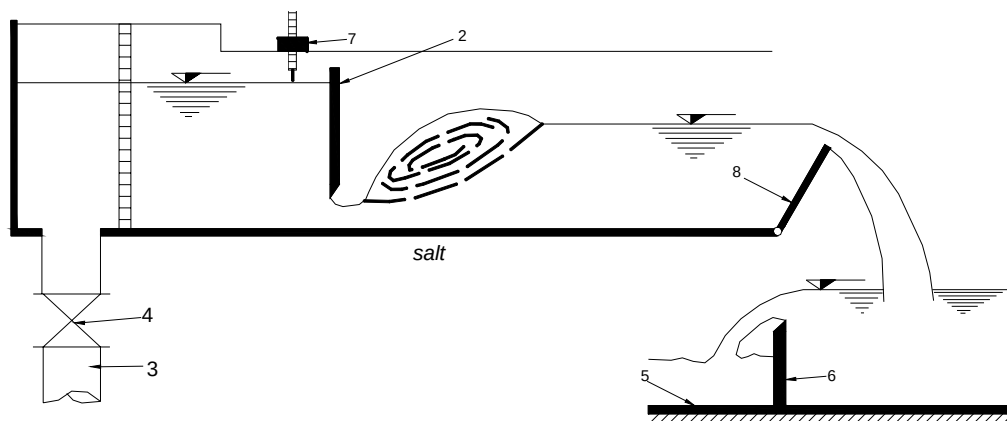


Fig. 25.2. Instalația experimentală pentru studiul saltului hidraulic

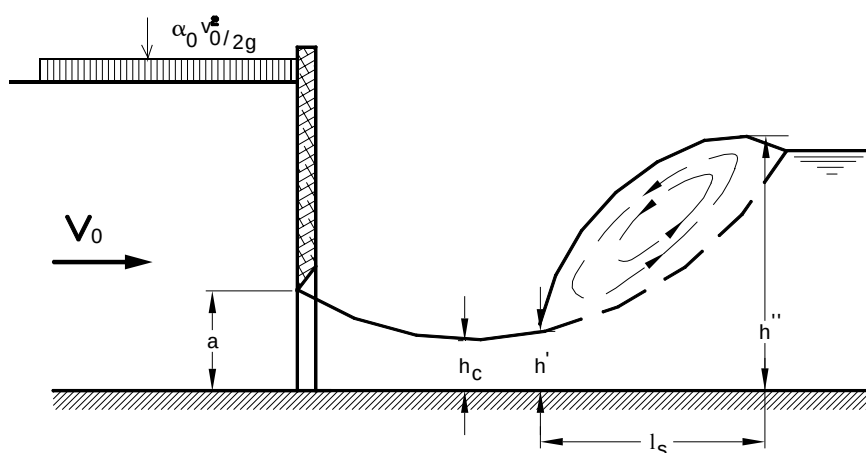


Fig. 25.3. Saltul hidraulic la ieșirea de sub stăvilă

[illegible]

Nr. crt.	h''_{ex} (m)	h'_{ex} (m)	h'_{calc} (m)	δ (%)
1				
2				
3				
4				
5				

[illegible]

LUCRAREA 26

RACORDAREA BIEFURILOR LA CURGEREA PESTE UN BARAJ DEVERSOR. DISIPATORI DE ENERGIE

26.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Într-un sistem hidraulic cu suprafața liberă curentul de apă suferă modificări ale nivelului, secțiunii, vitezei, pantei, datorită unor factori ce apar în cadrul mișcării, factori ce sunt de natură exterioară. Printre acestea menționăm: modificările bruște ale caracteristicilor geometrice ale albiei (secțiunea, panta etc.) și lucrări hidrotehnice executate în albie (deversoare, stăvilare, căderi etc.). Acestea duc la modificarea tipului de mișcare, dând naștere la o succesiune de sectoare de albie în care curentul se caracterizează printr-un anumit tip de mișcare. Acest sector poartă denumirea de “bief”. Practic, un curent cu suprafața liberă este o succesiune de biefuri.

Racordările biefurilor se pot face cu sau fără salt hidraulic. Tipul de racordare este determinat de regimul de mișcare amonte și aval, de factorul ce a produs modificarea. Racordarea cu salt hidraulic are loc în situația când în amonte există o mișcare rapidă, iar în aval există o mișcare lentă. Racordarea fără salt hidraulic, respectiv prin curba de remu, are loc când în amonte există regim rapid iar în aval același regim de mișcare.

Prin trecerea apei peste un deversor cu profil practic curb, lama deversantă trebuie să se racordeze cu nivelul normal din aval, corespunzător debitului de calcul, secțiunii și pantei longitudinale a biefului aval.

Comparând a doua adâncime conjugată h_2 cu adâncimea normală din bieful aval h_{av} , în situația în care s-a considerat că adâncimea contractată h_c este egală cu prima adâncime conjugată h_1 , rezulta următoarele cazuri:

- $h'' > h_{av}$ - racordarea cu salt îndepărtat;
- $h'' = h_{av}$ - racordarea cu salt în stare critică;
- $h'' < h_{av}$ - racordarea cu salt înecat sau apropiat.

În cazul racordării fără salt după deversor, rezultă că regimul de mișcare din aval este rapid, racordarea efectuându-se după o curbă de remu de tip c_2 sau b_2 .

În situațiile de racordare prezentate vitezele maxime se înregistrează la partea inferioară a curentului de apă, respectiv pe radierul construcției, fapt ce poate produce distrugerea acesteia. Racordarea de acest tip mai poartă denumirea, de racordare în regim de fund. Înlăturarea pericolului distrugerii construcției hidrotehnice prin acest regim de mișcare, cu viteze mari se face prin apropierea saltului hidraulic de construcție și limitarea până la zero a lungimii curbei de remu de tip b_2 sau c_2 . Aceasta se realizează printr-o construcție hidrotehnică, numită bazin de disipare a energiei.

Bazinele de disipare a energiei au diverse forme, iar adoptarea unui tip sau altul se face pe baza unui calcul tehnico – economic. Bazinul de disipare a energiei de formă paralelipipedică, fără construcții auxiliare se numește bazin simplu și poate fi realizat sub trei forme distincte:

- bazin de disipare a energiei prin adâncirea radierului (fig. 26.1);
- bazin de disipare a energiei cu prag sau perete aval (fig. 26.2);
- bazin de disipare a energiei prin combinarea celor două sau mixt (fig. 26.3).

Saltul hidraulic ce se formează în bazin poartă denumirea de salt forțat, cauza fiind prezența construcției aval.

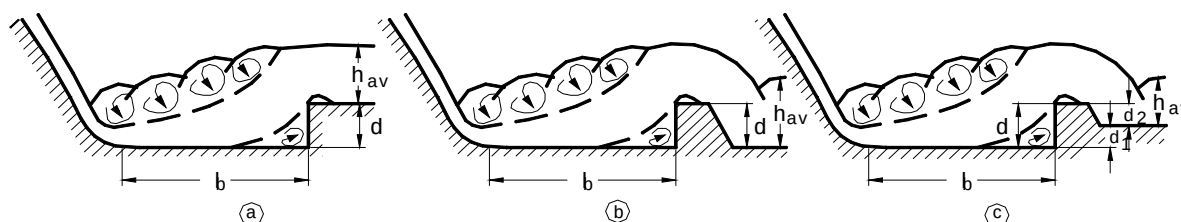


Fig. 26.1. Bazin disipator prin adâncirea radierului

Fig. 26.2. Bazin disipator cu prag

Fig. 26. 3. Bazin disipator mixt

26.2. SCOPUL LUCRĂRII

Pe canalul vitrat al laboratorului se vor determina parametrii hidraulici ai racordării a două biefuri, formate prin amplasarea unui deversor cu profil practic curb. Cu elementele geometrice și hidraulice măsurate se va proiecta un bazin disipator cu prag pe radier care amplasat ulterior în canalul vitrat, să înece saltul hidraulic format în aval pe deversor

26.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Pe canalul vitrat al laboratorului se află amplasat un deversor cu profil practic curb (fig. 26.4). Deversorul este prelungit cu un radier din tolă de oțel, pe care s-au prevăzut la distanțe diferite șuruburi de fixare a pragurilor disipatoare (fig. 26.5). Pragurile disipatoare au secțiunea transversală trapezoidală și au diverse înălțimi. Înălțimea apei se măsoară cu ajutorul unui ac de măsură, iar debitul canalului cu un deversor triunghiular. Canalul vitrat este alimentat de la stația de pompare al laboratorului prin intermediul unei conducte pe care este amplasată o vană.

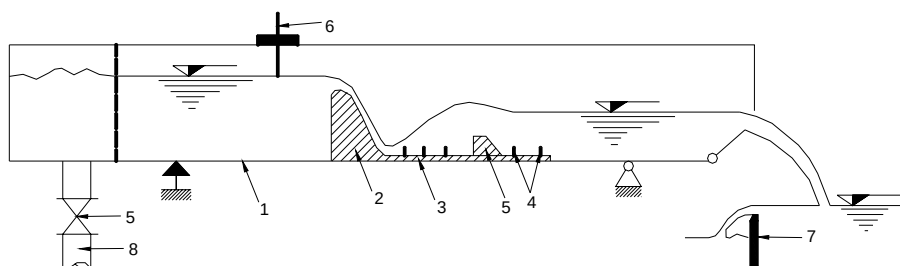


Fig. 26.4. Instalația experimentală

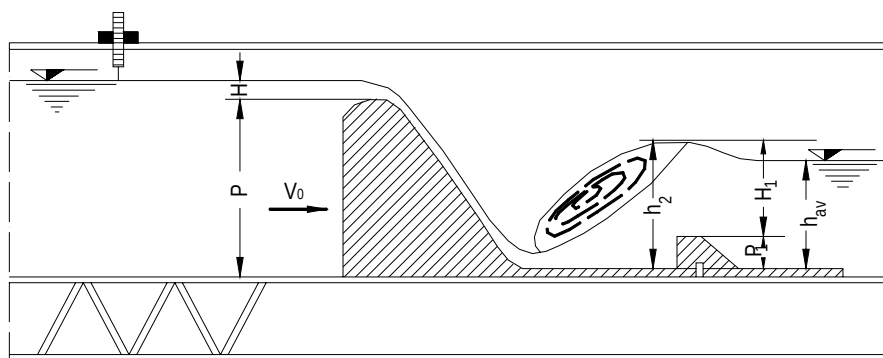


Fig. 26.5. Detaliu al instalației experimentale

26.4. MODUL DE LUCRU

Ordinea operațiilor pentru efectuarea lucrării este următoarea:

- vana de alimentare a canalului fiind închisă, se măsoară elementele geometrice caracteristice: B – lățimea canalului; p – înălțimea deversorului; I – panta canalului și cotele “0” la acele de măsură, atașate deversorului cu profil practic curb, respectiv deversorului de măsură triunghiular;
- se pornește instalația de pompare aferentă canalului vitrat și se deschide vana;

- după stabilirea unei sarcini constante pe deversor se măsoară elementele: h_d - înălțimea de apă pe creasta deversorului triunghiular;
- H - înălțimea de apă pe creasta deversorului cu profil practic curb, viteza de acces v_0 cu ajutorul unui flotor sau micromorișcă;
- h_c - adâncimea contractată;
- cu valorile măsurate se calculează: H_0 - sarcina pe deversor corectată cu termenul cinetic corespunzător vitezei de acces; h_c - adâncimea contractată pentru H_0 ; q debitul specific - calculate pe baza citirii efectuate pe deversorul triunghiular. Punând condiția $h_c = h'$, h' fiind prima adâncime contractată, cu valorile debitului, pantei și secțiunii canalului se calculează h_{av} (adâncimea normală pe bieful aval);
- se compară h'' : h_{av} și se determină tipul de salt și racordare;
- în situația $h'' > h_{av}$ se calculează elementele bazinului dissipator cu prag iar pe canal se montează la distanța L_b un prag dissipator de înălțime p_I rezultată din calcul;
- se verifică corectitudinea bazinului dissipator creat.

26.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA DATELOR

Determinarea debitului ce curge pe canal se face cu relația:

$$Q = Mh_d^{2,5}, \quad (26.1)$$

în care: M este constanta deversorului – $M = 1,38$;

- h_d sarcina măsurată pe deversorul triunghiular.

Determinarea adâncimii biefului aval se bazează pe aplicarea relațiilor cunoscute de la dimensionarea canalelor.

Adoptând secțiunea transversală a bazinului dissipator dreptunghiulară, se calculează adâncimea contractată " h_c " cu relația:

$$h_c = \frac{q}{\varphi \sqrt{2g(H_0 + p - h_c)}} \quad (26.2)$$

în care: q este debitul specific, $q = Q/b$; (26.3)

φ - coeficient de viteză

H_0 - sarcina totală pe deversorul curb,

$$H_0 = H + \frac{\alpha V_0^2}{2g}; \quad (26.4)$$

p - înălțimea deversorului cu profil practic curb.

Considerând $h_c = h'$, se calculează a doua adâncime conjugată cu relația:

$$h'' = \frac{h'}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{8g^2}{g(h')^3}} - 1 \right). \quad (26.5)$$

Din condițiile geometrice ale secțiunii și cele hidraulice impuse ($h_{av} > h''$ sau $h_{av} = \sigma h''$, cu $\sigma = (1,05 \dots 1,10)$) rezultă:

$$\sigma h'' = p_1 + H_1. \quad (26.6)$$

Înălțimea apei pe prag rezultă din ecuația debitului pe un prag deversor cu profil poligonal:

$$q = m \sigma_i \sqrt{2g} H_{01}^{3/2}, \quad (26.7)$$

în care:

$$H_{01} = H_1 + \frac{v_{01}^2}{2g} \quad (26.8)$$

și

$$v_{01} = \frac{q}{h''}, \text{ viteza în amonte de prag.} \quad (26.9)$$

Din (26.6) rezultă înălțimea pragului p_1 :

$$p_1 = \sigma h'' - H_1. \quad (26.10)$$

Lungimea la care va fi amplasat pragul față de deversor, respectiv lungimea bazinului disipator va fi:

$$L_b = (0,75 / 0,8) l_s, \quad (26.11)$$

în care: l_s este lungimea saltului

Dacă $p_1 > h_{av}$ - pragul va lucra ca un deversor neîneecat și deci calculul este corect.

Dacă $p_1 < h_{av}$ - pragul lucrează ca un deversor îneecat, iar soluția trebuie modificată deoarece coeficientul de îneecare σ_i din relația (26.7) luat inițial cu valoarea 1 depinde de raportul h_i/H_1 unde $h_i = h_{av} - p_1$. Deci înălțimea pragului trebuie determinată prin încercări sau grafic. Pentru aceasta se dau valori înălțimii pragului disipator p_1 ceva mai mici decât cele rezultate din calculul precedent și se calculează mărimile H_1 , h_i , h_i/H_1 și coeficientul de îneecare σ_i (se poate lua din tabele). Cu aceste valori se determină debitul q după relația (26.7). Se construiește graficul $q = f(p_1)$, din care se extrage înălțimea pragului p_1 ce corespunde debitului de calcul q .

Cu dimensiunile rezultate din calcul se alege pragul corespunzător și se montează pe radierul deversorului la înălțimea L_b calculată, observându-se confirmarea sau infirmarea efectuată.

LUCRAREA NR. 27

STUDIUL MIȘCĂRILOR POTENȚIALE PRIN
ANLOGIA HELLE-SHAW

27.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Analogia Helle-Shaw reprezintă un model experimental de mișcare care admite un potențial de viteză, lichidul fiind în mișcare laminară între doi pereți foarte apropiați, paraleli și transparenti.

Între acești pereți se fixează un corp sau un sistem de corpuri solide în jurul cărora curge un lichid cu o distribuție de viteză dată.

Scopul dispozitivului Helle-Shaw este de a reproduce mișcările potențiale plane, vizualizând liniile de curent cu ajutorul unor fire de curent.

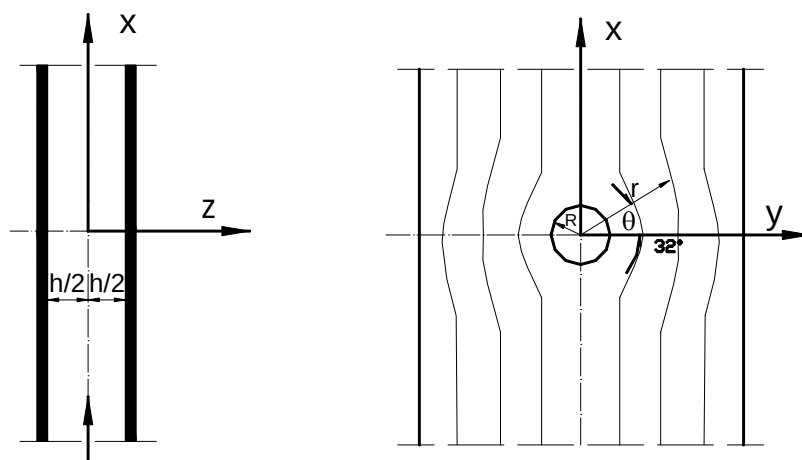


Fig. 27.1. Dispozitivul Helle – Shaw

Acest lucru este posibil, deoarece componentele vitezei din același strat vertical al lichidului vâscos ce se scurge între pereții de sticlă derivă dintr-o funcție de potențial, ca și componentele vitezei din cadrul mișcărilor potențiale plane, caracteristice mișcării fluidelor perfecte, la care:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}; \quad (27.1)$$

Pentru a arăta acest lucru, să considerăm sistemul de ecuații a lui Navier-Stokes pentru scurgerea plană între cele două plăci apropiate.

$$\begin{cases} X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \\ Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{cases} \quad (27.2)$$

Integrarea sistemului (27.2) se va efectua în următoarele ipoteze dictate de caracterul mișcării între cele două plăci:

- mișcarea fiind permanentă (presiunea de alimentare a dispozitivului fiind constantă):

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial w}{\partial t} = 0; \quad (27.3)$$

- forțele masice au componentele:

$$Y = Z = 0; \quad X = -g; \quad (27.4)$$

- plăcile fiind paralele componenta vitezei după axa Z:

$$w = 0; \quad (27.5)$$

- mișcarea fiind lentă se neglijează forțele inerțiale:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \cong 0; \quad \frac{\partial u}{\partial y} \cong 0; \quad \frac{\partial v}{\partial x} \cong 0; \quad \frac{\partial v}{\partial y} \cong 0. \quad (27.6)$$

În aceste condiții, sistemul (28.2) devine:

$$\begin{cases} -\gamma - \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = 0. \\ \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (27.7)$$

Din ultima relație se observă ca presiunea nu depinde de Z, deci la integrarea primelor două ecuații gradienti $\frac{\partial p}{\partial x}$ și $\frac{\partial p}{\partial y}$ pot fi considerați, iar soluțiile lor vor fi:

$$u = \frac{1}{\eta} \left(\gamma + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \frac{z^2}{2} + C_1 z + C_2$$

$$v = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial p}{\partial y} \frac{z^2}{2} + C_3 z + C_4$$

Din condițiile de limită; respectiv condițiile de aderență a lichidelor de pereții aparatului rezultă:

$$u = 0 \text{ pentru } Z = \pm h/2;$$

$$v = 0 \text{ pentru } Z = \pm h/2.$$

se determină constantele C_1, C_2, C_3, C_4 - rezultând:

$$u = 1/2 \eta \left(\gamma + \frac{\partial p}{\partial x} \right) \left(z^2 - \frac{h^2}{4} \right)$$

$$v = 1/2 \eta \frac{\partial p}{\partial y} \left(z^2 - \frac{h^2}{4} \right)$$
(27.8)

Într-un plan vertical oarecare, la care $Z = \text{const}$, se obține:

$$u = -K_1 \frac{\partial p}{\partial x} + K_2$$

$$v = -K_1 \frac{\partial p}{\partial y}$$
(27.9)

Deci componentele vitezei din același strat vertical derivă dintr-o funcție de potențial, care diferă de la un strat la altul:

$$\varphi = -K_1 p + K_2$$
(27.10)

Din ecuația de continuitate:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$
(27.11)

rezultă ca funcția φ verifică ecuația lui Laplace $\Delta \varphi = 0$, numai în condițiile în care presiunea este o funcție armonică ($\Delta p = 0$). Condițiile în care presiunea este o funcție armonică ($\Delta p = 0$).

Presiunea este o funcție armonică în cazul în care mișcarea lichidului vâscos, dintre plăci, e foarte lentă.

Astfel funcțiile φ și p verificând aceeași ecuație cu derivate parțiale (ec. Laplace) fenomenele vor fi analoage, diferind numai condițiile la limită. Această concluzie constituie baza analogiei Helle-Shaw.

27.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este vizualizarea mișcării potențial plane, în jurul unui cilindru circular fără circulație și compararea câmpului hidrodinamic obținut pe această cale cu cel rezultat prin teoria mișcărilor potențiale.

27.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig.27.2) se compune din două plăci transparente plan paralele (1), la distanța h , între care se fixează corpul (2) în jurul căreia are loc mișcarea, având raza R . Alimentarea cu lichid se face dintr-un distribuitor (3) prin robinet (4) cu presiunea constantă. Evacuarea este realizată prin deversoare în colector (5). Firele de curent sunt materializate prin injectoarele (6) care primesc colorantul din vas (7) și robinet (8).

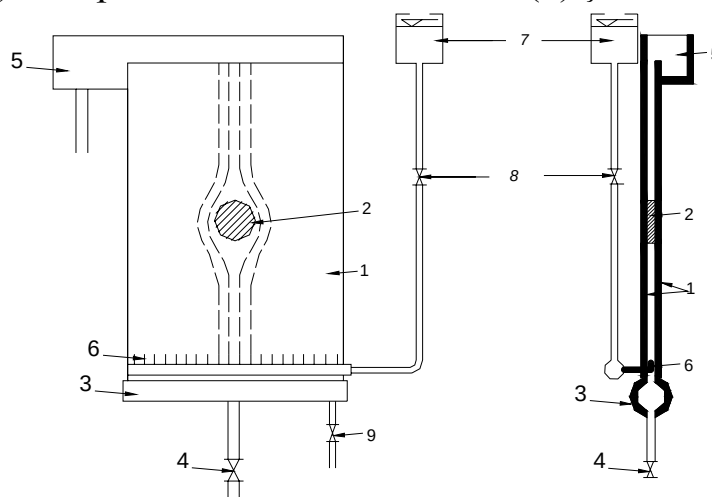


Fig. 27.2. Schema instalației experimentale

27.4. MODUL DE LUCRU

Se măsoară distanța dintre injectoare, distanța dintre plăcile plan paralele, lățimea efectivă de curgere a aparatului.

Se deschide robinetul de alimentare și se așteaptă până ce evacuarea funcționează.

Se pornesc injectoarele de colorat și se reglează debitul până ce firele de curent colorate devin subțiri.

După stabilizarea mișcării se reproduce pe calculator liniile de curent materializate.

Concomitent se măsoară debitul scurs prin instalație volumetric.

După terminarea experiențelor se oprește colorantul și se spală bine aparatul, după care se golește prin robinet.

27.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Pentru trasarea teoretică a liniilor de scurgere se plasează de la potențialul complex al mișcării în jurul cilindrului:

$$f(Z) = V_{\infty} \left(Z + \frac{R^2}{Z} \right) = \varphi + i\psi, \quad (27.12)$$

în care:

$Z = x + iy = re^{i\theta} (\cos \theta + i \sin \theta)$ este variabila complexă;

V_{∞} - viteza la infinit amonte adică viteza mișcării uniforme a curentului dintre plăci, neperturbat de prezența cilindrului, $V_{\infty} = Q/hB$.

Din această relație se obține potențialul vitezelor, în coordonate polare.

$$\varphi = V_{\infty} \cos \theta \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \quad (27.13)$$

și ecuațiile liniilor de curent:

$$\psi = V \sin \theta \left(r + \frac{R^2}{r} \right) \quad (27.14)$$

Aparatul Helle-Shaw având injectoare de colorat la distanța „ a ” unul de altul, pentru funcția ψ la infinit amonte unde liniile de scurgere sunt paralele, se poate lua valorile:

$$\psi_n = \left(\frac{a}{2} + na \right) V_{\infty} \quad (27.15)$$

Aceste valori rezultă din relația (28.14), neglijându-se termenul al doilea deoarece la infinit amonte $r \gg R$, iar $\sin \theta = a/2 + na$, pentru fiecare din cele n injectoare, $n = 0, 1, 2, \dots, n$, reprezintă numărul de ordine al injectorului. Se poate determina astfel $r(\theta)$, dându-se valori lui $\psi = \psi_n$ în relația (28.14):

$$r = \frac{\psi_n + \sqrt{\psi_n^2 + 4R^2V_{\infty}^2 \sin^2 \theta}}{2V_{\infty} \sin \theta} \quad (27.16)$$

Liniile de scurgere $\psi_n = \text{const.}$ Se trasează după relația (27.16), la scara aparatului.

LUCRAREA 28

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A CONDUCTIVITĂȚII HIDRAULICE ÎN MEDII POROASE

28.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Mișcarea apei prin medii poroase se studiază pe baza unei scheme simplificate de calcul, schema în care se consideră această mișcare că are loc prin tot spațiul ocupat de solid și de lichid. Această mișcare a fost studiată de Darcy, care a dat și legea de mișcare sub următoarea formă:

$$V = ki, \quad (28.1)$$

în care: - v – este viteza;

$$i - \text{panta hidrolică; } \frac{h}{l} = \frac{\text{diferența de nivel}}{\text{lungimea drumului filtrației}}$$

k – coeficient de conductivitate hidrolică.

Legea descoperită de Darcy nu este o lege generală a mișcării apei subterane, ea aplicându-se numai în anumite limite, respectiv pentru o parte a regimului laminar de curgere.

Valoarea critică a numărului Reynolds care încadrează această mișcare laminară este dată după diverși autori astfel:

$$\text{- Schneebeli - } Re_{cr} = \frac{v \cdot d}{\nu} = 2 \dots 5; \quad (28.2)$$

$$\text{- Pavlovski - } Re_{cr} = \frac{1}{0,75 \cdot n + 0,23} \cdot \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (28.3)$$

$$\text{- Universitatea din Columbia } Re_{cr} = \frac{v \cdot d}{\nu \cdot n^{1/3}} = 6 \quad (28.4)$$

În aceste relații : R_{cr} este numărul lui Reynolds la care se termină domeniul de valabilitate a legii lui Darcy;

n – porozitatea

d – diametrul mediu al particulelor solide ;

ν - coeficient de vâscozitate cinematică ;

v – viteza de filtrare.

Între regimul laminar și turbulent există o largă zonă de tranziție.

Noțiunea de permeabilitate se referă la proprietatea mediului permeabil și nu depinde de fluidul care se infiltrează. Relația de calcul este:

$$k_p = Sl \cdot d^2 \quad \text{sau} \quad k_p = c \left(\frac{v}{s} \right)^2 \frac{n^3}{(1-n)^2} d^2, \quad (28.5)$$

în care: k_p este coeficient de permeabilitate;

d – diametru mediu al particulelor;

Sl – numărul lui Slichter, adimensional și depinde de forma porilor ;

$\frac{v}{s}$ - raportul dintre volum și suprafața porilor ;

n – porozitatea.

Coeficientul de conductivitate hidraulică este o funcție de caracteristicile mediului permeabil, cât și a lichidului care se infiltrează. Se calculează cu relația:

$$k = Sl \frac{\gamma_w}{\eta} d^2 \quad (28.6)$$

în care: k este coeficientul de conductivitate hidraulică;

γ_w - greutatea specifică a apei;

η - coeficient de vâscozitate dinamică.

Ocupând un prim loc în cadrul studiilor necesare proiectării lucrărilor hidrotehnice, conductivitatea hidraulică se poate determina prin diverse metode:

- prin formule empirice;
- prin permeametre de laborator;
- prin măsurători în teren.

a. Utilizarea formulelor empirice este orientativă în determinarea conductivității hidraulice.

Formula de calcul în general are următoarea formă:

$$k = A d_e^2 \quad (28.7)$$

în care : A este un coeficient;

d_e - diametru eficace sau efectiv.

Utilizarea formulelor empirice implică cunoașterea curbelor granulometrice (fig. 28.1) din care rezultă diametrul efectiv (în general corespunde procentului de 10%), sau se calculează pe baza unor formule

specializate. De asemenea trebuie cunoscute porozitatea „ n ”, vâscozitatea dinamică „ η ” sau cinematică „ ν ” a apei, precum și temperatura acesteia „ t ”.

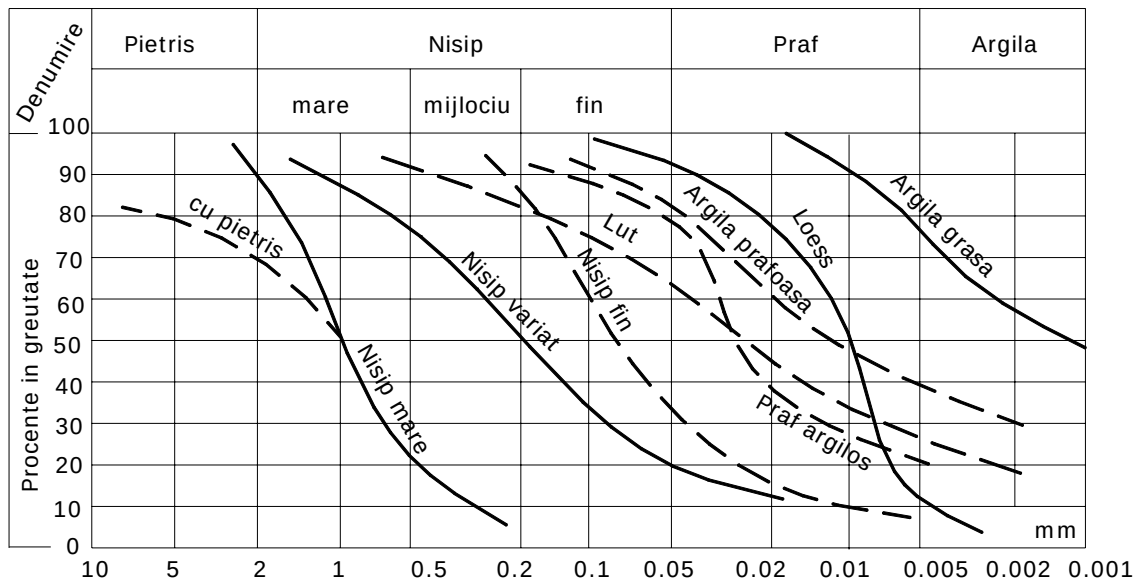


Fig. 28.1. Curbele granulometrice ale pământurilor

Cele mai utilizate formule sunt:

Relația lui A. Hazen pentru nisipuri omogene cu $\frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 5$ și

$0,1 < d_e < 3$ mm:

$$k = B \cdot C \cdot \tau \cdot d_{10}^2 \quad (28.8)$$

în care:

B este un coeficient ce depinde de unitățile de măsura folosite, pentru $B = 1$ rezultă k în m/zi ;

C – este un coeficient ce depinde de „gradul de murdărire” a nisipului cu fracțiuni fine (argilă). Valorile coeficientului C sunt date în tabelul 28.1

$d_e = d_{10}$ - diametrul efectiv în mm;

τ - coeficient adimensional de corecție, funcție de temperatură;

$$\tau = 0.70 + 0.30 t \quad (t^0 \text{ în grade Celsius}) \quad (28.9)$$

Tabel 28.1. Valoarea coeficientului C funcție de diametrul și procentul fracțiunilor fine.

Diametrul particulelor (mm)			C
0.05-0.01	0.01-0	0-0.05	
Procentul de fracții fine			
0.20	0.20	0.50	1200
0.50	0.50	1.50	1100
1.00	1.00	3.00	1000
2.00	2.00	5.00	900
3.50	3.00	7.00	700
4.00	4.00	9.00	500

Se observă pentru nisip aproximativ curat $C = 1000 - 1200$ iar pentru nisip murdar $C = 500 - 900$.

Pentru $t = 10^0 \text{ C}$ și $C = 860$, rezultă: $k(\text{cm/s}) = d_e^2$, (d în mm);

- formula lui Kozeny – pentru nisipuri:

$$k = 7.94 \frac{n^3}{(1-n)^2} \tau \cdot d_{10}^2; \quad (28.10)$$

Pentru „ d'' ” în (mm) rezultă k în (cm/s);

τ - coeficient de corecție a temperaturii după tabelul următor :

Tabel 28.2. Valorile lui τ pentru relația lui Kozeny

$t^0(\text{C})$	0	5	10	15	20	25	30
τ	0.59	0.70	0.81	0.93	1.05	1.18	1.31

- formula Zamarin:

$$k = 8,07 \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot C_p \cdot \tau \cdot d_e^2 \text{ (cm/s) pentru } d \text{ în (mm)} \quad (28.11)$$

în care τ se ia din tabelul 28.2 iar C_p este un coeficient suplimentar în funcție de porozitate, fiind dat în tabelul 28.3.

Tabelul 28.3. Valorile lui C_p

n	27	35	40	45
C_p	0.757	0.562	0.456	0.360

O altă relație dată de Zamarin este:

$$k_{10} = 5572 \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot a^2 \cdot d_z^2 \text{ (m/zi)} \quad (28.12)$$

în care : k_{10} este conductivitatea hidraulică pentru temperatura de 10^0 C ;

a - coeficient ce depinde de porozitate:

$$a = 1,275 - 1,5n; \quad (28.13)$$

d_z - diametru ponderat funcție de greutatea diferitelor fracții din curba granulometrică:

$$d_z = \frac{100}{\frac{3}{2} \frac{g_1}{d_1} + \sum \left(\frac{g_i}{d_i - d_{i-1}} \cdot \ln \frac{d_i}{d_{i-1}} \right)} \quad (28.14)$$

b. Determinarea conductivității în laborator folosind permeametrele
se bazează pe folosirea unor probe luate din teren. Probele pot fi luate în stare tulburată sau naturală. Permeametrele se pot clasifica după principiul de funcționare astfel:

- permeametre cu sarcină constantă;
- permeametre cu sarcină variabilă;
- permeametre cu sarcină variabilă și volum de apă constant;
- permeametre cu aer;
- permeametre radiale.

b.1. Permeametrul cu nivel constant

Un volum de apă „ V ” străbate transversal o lungime „ L ” dintr-o probă, într-un interval de timp „ t ”. Dacă „ h ” este sarcina constantă sub care are loc scurgerea și „ A ” secțiunea probei rezultă relația de calcul a conductivității sub forma:

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad (28.15)$$

b.2. Permeametrul cu sarcina variabilă

Se bazează pe principiul trecerii unui volum de apă „ V ” printr-o probă de lungime „ L ” și secțiune „ A ” într-un interval de timp „ t ”, sub o pierdere de sarcină „ $h_0 - h$ ”.

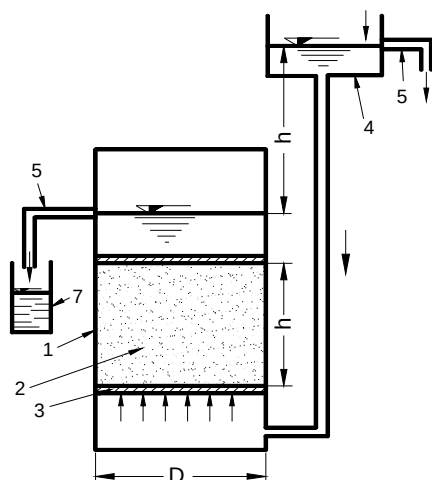


Fig. 28.2. Permeamtru cu sarcină constantă

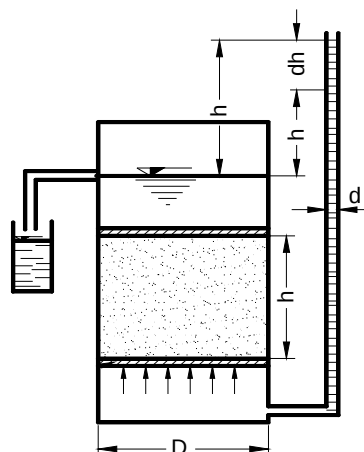


Fig. 28.3. Permeametrul cu sarcină variabilă

Pentru determinarea relației de calcul se pleacă de la volumul elementar ce se infiltrează prin proba, dV :

$$dV = k \cdot A \cdot I dt = k \cdot A \frac{h}{L} dt. \quad (28.16)$$

Dacă a este secțiunea tubului de alimentare rezultă volumul de apă, rezultă:

$$V = a(h_0 - h), \quad (28.17)$$

iar

$$dV = -adh \quad (28.18)$$

înlocuind (28.18) în (28.16) rezultă:

$$-a \cdot dh = kAh \frac{dt}{L} \text{ sau } \frac{dh}{h} = -k \frac{A}{a} \frac{dt}{L} \text{ sau } \frac{dh}{h} = -k \frac{D^2}{d^2} \frac{dt}{L}. \quad (28.19)$$

Integrând expresia (28.19) se obține:

$$\ln h = -k \frac{D^2}{d^2} \frac{t}{L} + C \quad (28.20)$$

din condițiile la limită $t = 0$: $h = h_0$ rezultă:

$$C = \ln h_0 \text{ sau } \ln h_0 - \ln h = \ln \frac{h_0}{h} = k \frac{D^2}{d^2} \cdot \frac{t}{L}$$

în care:

$$K = \frac{d^2 L}{D^2 t} \ln \frac{h_0}{h} \text{ sau } k = 2,302 \frac{d^2 L}{D^2 t} \lg \frac{h_0}{h} \quad (28.21)$$

Pentru d, D, L, h_0, h în (m) și t în (s) rezultă k în (m/s).

b.3. Permeametrul radial se bazează pe același principiu ca celelalte permeametre numai că mișcarea apei se face radial prin probă, apropiindu-se de metoda de măsurare în teren. Relația de calcul este următoarea:

$$K = \frac{d_t^2}{8 \cdot h \cdot t} \ln \frac{d_e}{d_i} \ln \frac{H_i}{H_f} \quad (28.22)$$

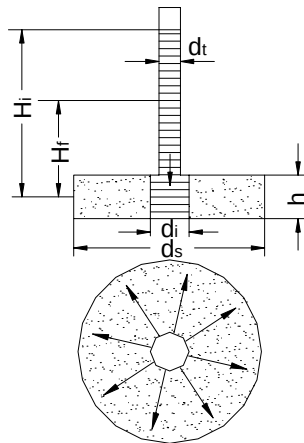


Fig. 28.4. Secțiuni caracteristice prin permeametrul radial

c. Determinarea conductivității hidraulice prin măsurători în teren se poate face prin:

- încercări de debitare prin pompare cu ajutorul pomparei unui debit constant dintr-un puț și a denivelărilor măsurate S_0 și S_1 în puț și la distanța de puț $r \in (5 - 10\text{m})$, rezultă pentru:

- strat acvifer sub presiune:

$$k = \frac{Q \ln r_1 / r_2}{2 \cdot \pi \cdot a [(H - S_1) - (H - S_0)]}; \quad (28.23)$$

- strat acvifer cu nivel liber:

$$k = \frac{Q \ln r_1 / r_0}{\pi [(H - s_1)^2 - (H - S_0)^2]}; \quad (28.24)$$

- încercări punctuale cu permeametre cu nivel variabil amplasate în situ;

- măsurii prin metode speciale (trasări, indicatori etc.).

28.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este determinarea în laborator cu ajutorul unui permeametrul cu nivel constant a conductivității hidraulice pentru o probă și verificarea valorii obținute cu ajutorul relațiilor empirice.

28.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Permeametrul vertical cu nivel constant (fig. 28.5) se compune dintr-un cilindru vertical în care se pune proba. La capetele probei se pun site sau material poros pentru a uniformiza pătrunderea apei. Alimentarea se face prin intermediul unui rezervor cu nivel constant și cu preaplin. Apa străbate proba de jos în sus pentru evitarea colmatării filtrelor și evacuarea bulelor de aer. Evacuarea se face într-un vas de măsura gradat. După stabilizarea mișcării se măsoară debitul volumetric, precum și temperatura apei.

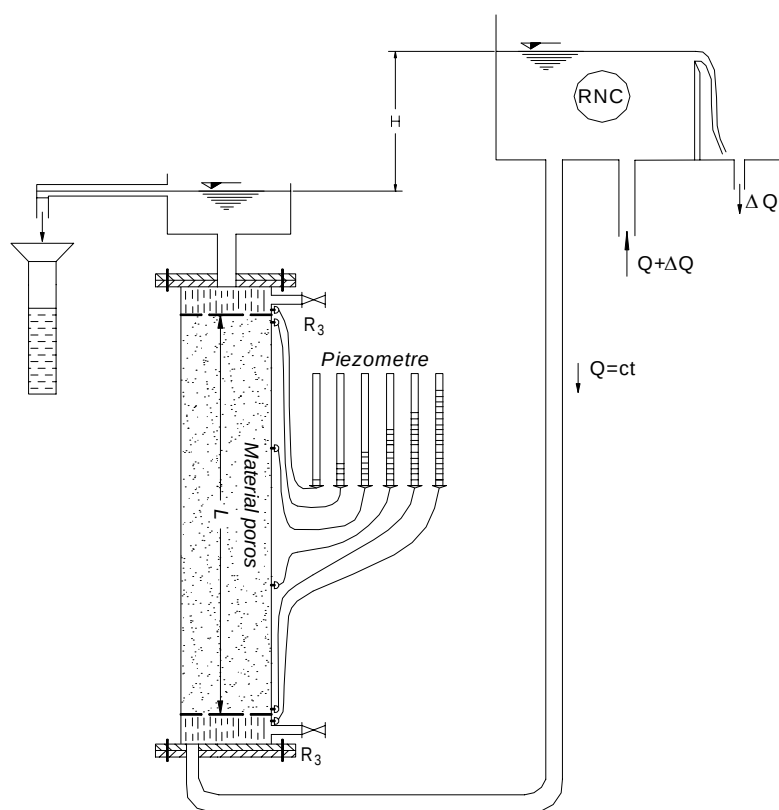


Fig. 28.5. Permeamtru vertical

28.4. MODUL DE LUCRU

Modul de lucru decurge din însuși principiul de funcționare a permeametrilor. Pentru început se determină elementele geometrice ale probei și permeametrului respectiv - D = diametrul probei, L = înălțimea sau lungimea probei. Se alimentează permeametrul cu apă și după stabilizarea mișcării se determină elementele hidraulice (debit volumetric și sarcina sub care are loc mișcarea) și temperatura. Măsurătorile se efectuează de la 3 – 5 ori pentru eliminarea erorilor. Rezultatele măsurătorilor se trec în tabelul 29.4.

28.5. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Folosind ecuația (28.15) cu valorile experimentale se calculează conductivitatea hidraulică, k .

Pentru determinarea valorii conductivității hidraulice cu ajutorul relațiilor empirice, se extrag din curba granulometrică a materialului diametrul efectiv – d_{10} și d_{60} . Funcție de textura materialului existent în permeamtru se va folosi relația de calcul (28.8), (28.10), (28.12). Valorile experimentale calculate pentru k se trec în tabelul 28.4, iar cele calculate cu relațiile empirice în tabelul 28.5.

Valorile experimentale prelucrate statistic se vor compara cu cele rezultate din relațiile empirice.

Tabel 28.4. Prelucrarea valorilor experimentale

Nr. crt.	V (m ³)	L (m)	A (m ²)	t (s)	h (m)	K (m/s)	Obs.
1							
.							
.							
.							
5							

Tabel 28.5. Prelucrarea valorilor pe baza relațiilor empirice

Nr. crt.	textura	d_{10} (mm)	d_{60} (mm)	η %	t (°C)	τ	C_p (C)	k
----------	---------	------------------	------------------	-------------	-------------	--------	-----------	-----

DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A PARAMETRILOR MIȘCĂRII GRADUAL VARIATE A APEI SUBTERANE

La studiul mișcării neuniforme a apei subterane se admite ipoteza lui Dupuit (o ipoteză cinematică asupra liniilor de curent), liniile de curent sunt paralele între ele. Consecința acestei ipoteze este distribuția uniformă pe verticală a vitezelor și gradientilor hidraulici. La această mișcare se disting trei cazuri, după cum panta patului impermeabil este în sensul curgerii ($i > 0$), inversa curgerii ($i < 0$) sau este nulă ($i = 0$).

În cazul $i > 0$, plecând de la legea lui Darcy: $v = kI$, ecuația diferențială a mișcării este:

$$I = -\frac{H}{dl} = \sin \alpha - \frac{dh}{dl} \cong tg \alpha - \frac{dt}{dl} = i - \frac{dh}{dl} . \quad (29.1)$$

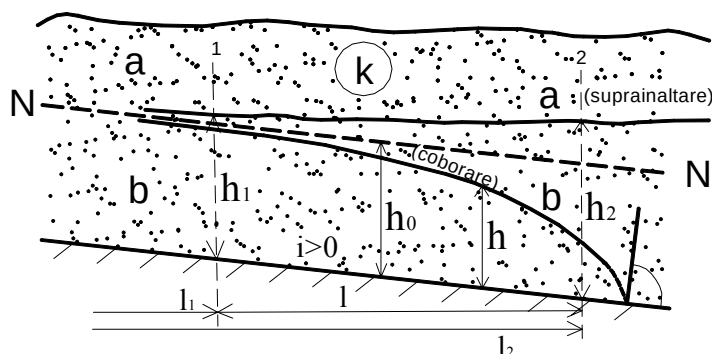


Fig. 29.1. Formele suprafeței libere la infiltrații cu $i > 0$

Înlocuind în relația lui Darcy se obține:

$$V = K(i - \frac{dh}{dl}), \quad (29.2)$$

sau:

$$Q = k \cdot A \left(i - \frac{dh}{dl} \right) \quad (29.3)$$

Ținând seama de ecuația mișcării uniforme, rezultă:

$$A_0 \cdot k \cdot i = A \cdot k \left(i - \frac{dh}{dh} \right) \quad (29.4)$$

și notând $A/A_0 = \eta$ (pentru albi dreptunghiulare $\eta = h/h_0$), se obține:

$$\frac{dh}{dl} = i \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \quad (29.5)$$

Suprafața liberă $h=h(l)$ se împarte în două zone, a și b .

În zona a : $h > h_0$; $A > A_0$; $\eta > 1$ și $dh/dl > 0$. Adâncimea apei subterane crește în lungul curentului. Linia suprafeței libere se racordează în amonte la linia suprafeței în mișcarea uniformă iar în aval tinde asimptotic la o orizontală.

În zona b : $h < h_0$; $A < A_0$; $\eta < 1$; $dh/dl < 0$. Adâncimea curentului subteran scade în raport cu patul impermeabil în lungul curentului. În partea amonte linia suprafeței libere se racordează cu linia suprafeței în mișcare uniformă iar în aval, la $h = 0$ este normală la patul impermeabil. În partea aval liniile de curent nu sunt paralele și orizontale, deci nu este respectată ipoteza lui Dupuit.

Prin integrarea ecuației (29.5) în albi dreptunghiulare se obține :

$$\frac{i(l_2 - l_1)}{h_0} = \frac{il}{h_0} = \eta_2 - \eta_1 + 1n \frac{\eta_2 - 1}{\eta_1 - 1}, \quad (29.6)$$

iar debitul specific este:

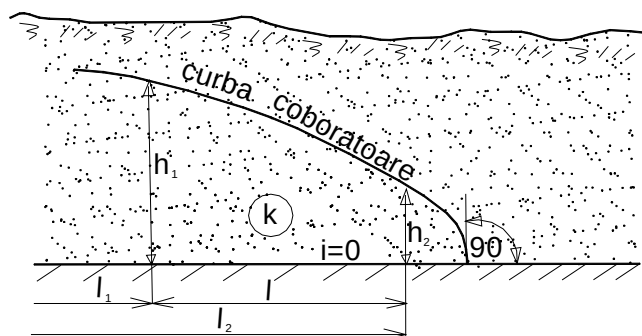
$$q = \frac{k(h_2^2 - h_1^2)}{2l} + \frac{k \cdot i(h_2 + h_1)}{2}. \quad (29.6')$$

29.1.2. Cazul $i = 0$

În acest caz ec. (29.4) devine:

$$Q = -kA \frac{dh}{dl} \quad (29.7)$$

În tot domeniul mișcării linia suprafeței libere coboară în sensul curgerii ($dh/dl < 0$).

Fig. 29.2. Forma suprafeței libere la infiltrații cu $i = 0$

La partea terminală a curbei nu este valabilă ipoteza lui Dupuit.

În cazul albiilor subterane dreptunghiulare $A = bh$, iar $q = Q/b$. În acest caz:

$$q = -kh \frac{dh}{dl} \quad (29.7')$$

Integrând ecuația în intervalul 1 se obține:

$$q = \frac{k(h_2^2 - h_1^2)}{2l} \quad (29.8)$$

Suprafața liberă este o parabolă (a lui Dupuit).

29.1.3. Cazul $i < 0$

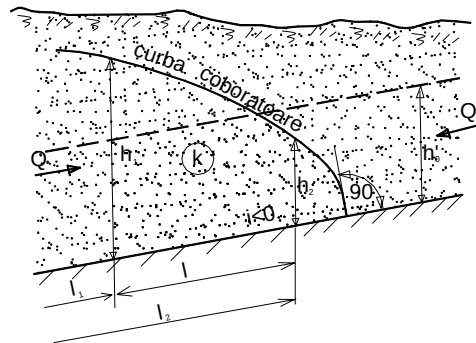
În acest caz se transcrie ecuația (30.4) cu notația $i' = -i$, și se admite că mișcarea uniformă are loc în sens invers mișcării care se studiază :

$$Q = kA_0' \cdot i' \quad (29.9)$$

Notând $A/A_0 = \xi$ (pentru albiile dreptunghiulare $\xi = h/h_0$), se obține:

$$\frac{dh}{dl} = -i' \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \quad (29.10)$$

Adâncimea apei subterane în raport cu patul impermeabil scade în lungul curentului ($dh/dl < 0$).

Fig. 29.3. Forma suprafeței la infiltrații $i < 0$

Integrala ecuației (29.10) în limitele l_1, l_2 pentru albi dreptunghiulare, este:

$$\frac{i'(l_2 - l_1)}{h'_0} = \frac{i'l}{h'0} = -(\xi_2 - \xi_1) + \ln \frac{1 + \xi_2}{1 + \xi_1}, \quad (29.11)$$

iar debitul specific:

$$q = \frac{k(h_2^2 - h_1^2)}{2l} - \frac{k.i(h_2 + h_1)}{2}. \quad (29.11')$$

29.2. SCOPUL LUCRĂRII

Scopul lucrării este determinarea experimentală a parametrilor mișcării subterane gradual variate (poziția liniei piezometrice, debitul curgerii) și compararea acestor parametri cu cele obținute pe cale teoretică.

29.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Instalația experimentală (fig. 29.4) se compune din cuva propriu-zisă cu material filtrant, cuva de alimentare, cuva de evacuare. Cuvă cu material filtrant este despărțită de cuvele de alimentare și de evacuare prin site. În cuva de alimentare nivelul se menține constant cu ajutorul preaplinului. Alimentarea cu apă se realizează prin robinetul R_1 și conducta. La evacuare se pot obține nivele constante cu diferite valori prin ștuțuri. Nivelul piezometric se măsoară la tabloul piezometric care este legat la prize. Panta instalației (pozitivă, negativă sau orizontalitate) se realizează cu ajutorul articulației reazemului simplu și indicatorului. Evacuarea apei este facilitată de conducta de colectare și recirculare.

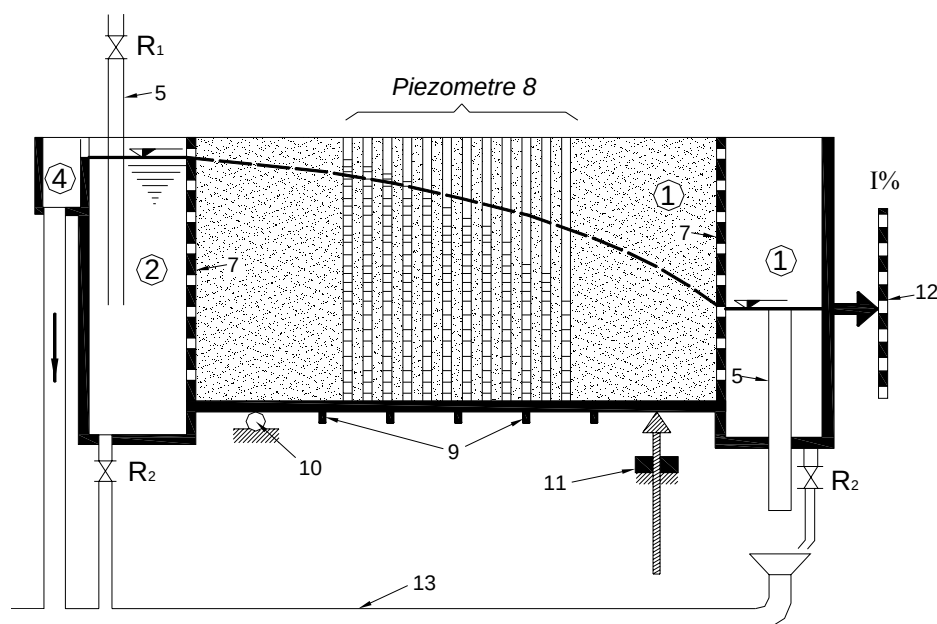


Fig. 29.4. Instalația experimentală

29.4. MODUL DE LUCRU

Se verifică robinetii R_2 să fie închisi. Se montează ștuțul de înălțime dorită și se fixează panta instalației. Se deschide robinetul R_1 și se reglează așa fel încât preaplinul să se evacueze puțină apă. Se așteaptă până ștuțul evacuează un debit constant și nivelul apei în tuburile piezometrice se stabilizează.

Se măsoară debitul volumetric (Q) și se citesc nivelurile din tuburile piezometrice (h_i), aflate la distanța (l_i) de alimentare. Valorile experimentale se trec în tabelul 29.1

29.5. PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE

Cunoscând coeficientul de conductivitate hidraulică „ k ”, lățimea „ b ” a domeniului mișcării și elementele măsurate din tabelul 29.1. se calculează din ecuațiile (29.6) (29.8) (29.11) înălțimile piezometrice teoretice $h_1, \dots, h_{10}$.

Sarcinile piezometrice (teoretice și experimentale se reprezintă grafic funcție de distanța la scara precum și abaterile relative δh . Pe grafic se va trasa și linia patului impermeabil.

Se compară debitul specific obținut experimental cu debitul obținut teoretic prin ecuațiile 29.6', 29.8, 29.11'.

LUCRAREA 30

TRASAREA SPECTRULUI HIDRONAMIC PRIN METODA ANALOGIEI ELECTRO – HIDRODINAMICE

30.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Analogia este o metodă de studiu experimental a fenomenelor aparținând diferitelor domenii ale fizicii, care se bazează pe identitatea formală a relațiilor matematice care descriu fenomenul și modelul său.

Între orice sistem primar și analogul sau există o corespondență biunivocă, fapt care constituie avantajul metodei analogiei, deoarece numeroase variabile care adesea sunt imposibil de măsurat în sistemul primar, pot fi ușor determinate pe modelul analogic și în acest mod devin accesibile sistemului primar.

Analogia electro-dinamică se bazează pe identitatea formală a relațiilor câmpului electric, al curentului introdus într-un mediu conducător omogen și câmpul hidrodinamic.

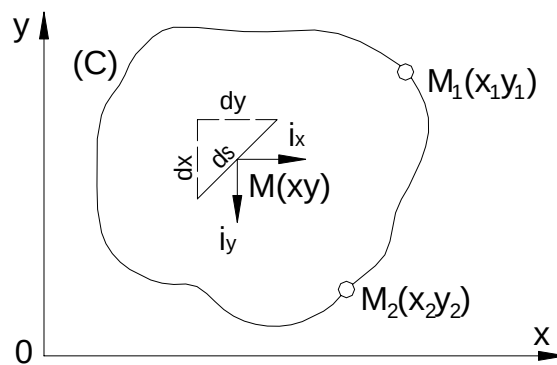


Fig. 30.1. Schema de calcul a elementelor electrice

Se consideră un mediu conducător plan și omogen având grosimea z și un punct $M(x, y)$ aparținând elementului $ds(dx, dy)$ în care componentele densității curentului sunt i_x și i_y .

Curentul prin suprafața elementară $z ds$ este:

$$dI = z i_x dx - z i_y dy . \quad (30.1)$$

Integrând relația (30.1) pe curba închisă C , care înconjoară elementul considerat, ipoteza că în interiorul suprafeței limitată de această curbă nu există nici o sursă de curent, se obține:

$$\oint_C (-z i_x dy + z i_y dx) = 0 \quad (30.2)$$

Integrând aceeași expresie pe arcul $M_1(x_1, y_1); M_2(x_2, y_2)$ rezultă:

$$\int_L (-z i_x dy + z i_y dx) = \psi(xy), \quad (30.3)$$

$\psi(x, y)$ fiind funcția curentului electric.

Relația (30.3) ne conduce la următoarele legături:

$$z i_y = \frac{\partial \psi}{\partial x}; z i_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}. \quad (30.4)$$

Din legea lui Ohm rezultă:

$$d\phi = -\rho(i_x dx + i_y dy) \quad (30.5)$$

unde: $\phi(x, y)$ este potențial electric;

ρ - rezistivitatea mediului conducător.

Din relația (30.5) se obțin expresiile:

$$-\rho i_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}; \quad -\rho i_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}. \quad (30.6)$$

Ecuatiile (30.4) și (30.6) determină repartitia curentului în conductorul considerat. Comparând aceste relații cu sistemul de hidrodinamică:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (30.7)$$

care exprimă legătura dintre funcția de potențial ϕ și funcția de curent ψ rezultă două analogii posibile.

30.1.1. Analogia directă (tip A)

Se pot scrie egalitățile:

$$v_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{-\partial \phi}{\partial x} = \frac{\rho}{z} \frac{\partial \psi}{\partial y} = \rho i_x$$

$$v_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{\rho \partial \psi}{z \partial x} = \rho i_y,$$

din care rezultă:

$$\begin{aligned} v_x &= \rho i_x \quad \varphi = \phi \\ v_y &= \rho i_y \quad \psi = \frac{\sigma}{z} \psi \end{aligned} \quad (30.8)$$

unde σ - conductivitatea mediului conducător ($\sigma = l/\rho$).

Liniile curentului electric și liniile de curent hidrodinamic sunt identice, ambii vectori, curent și viteză au aceeași direcție și sens, liniile echipotențiale ale câmpului electric corespund liniilor echipotențiale ale câmpului hidrodinamic.

Granițele modelului electric, ce corespund conturului corpului pe lângă care are loc curgerea sunt constituite din izolator.

Analogia electrică unei curgeri plane a unui lichid ideal în jurul unui profil oarecare se va realiza într-un conducător plan de grosime constantă alimentat pe două laturi de o sursă de curent electric, conturul profilului fiind realizat din material izolator.

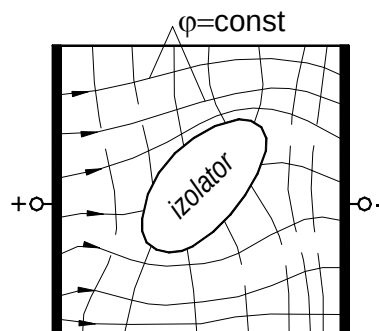


Fig. 30.2. Analogia directă

30.1.2. Analogia indirectă (tip B).

În acest caz se pot scrie egalitățile:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{-\partial \varphi}{\partial x} = \frac{-\partial \psi}{\partial x} = z i_y; \\ v_y &= -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial y} = z i_x \end{aligned}$$

din care rezultă:

$$\begin{aligned} v_x &= z i_y \quad \varphi = \psi \\ v_y &= z i_x \quad \phi = \frac{\sigma}{z} \psi \end{aligned} \quad (30.9)$$

Liniile de curent electric coincid cu liniile potențialului hidrodinamic, iar vectorii viteză și vectorii curent se găsesc sub un unghi de 90° .

În această analogie granițele, ce corespund conturului corpului pe lângă care are loc curgerea, sunt constituite din conductor metalic.

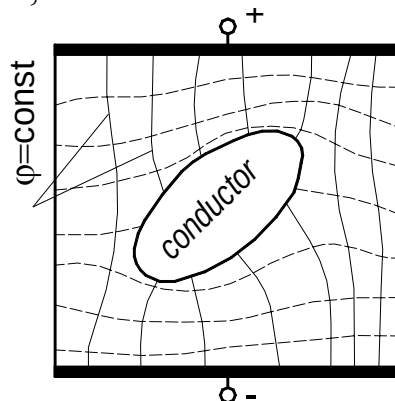


Fig. 30.2. Analogia indirectă

În practica modelării electro-hidrodinamice se stabilește mai întâi scara dimensiunilor geometrice, deoarece modelul electric satisface în general similitudinea geometrică.

Mediul conducător în care se face modelarea poate fi constituit din foiță metalică subțire, din rețea de rezistență sau cuva de electrolit. Alimentarea modelului se face cu curent continuu cu excepția utilizării electrolitilor când este obligatorie folosirea curentului alternativ pentru a se evita polarizarea electrolitilor.

Punerea în evidență a liniilor echipotențiale se face cu ajutorul unei sonde după o schemă în puncte, iar transpunerea pe desen, grafic, la scară convenabilă.

30.2. SCOPUL LUCRĂRII

Se va studia infiltrația sub trei forme de fundații ale unor construcții hidroameliorative.

- radier general plan pe terenul omogen;
- radier orizontal cu palplanșe pe teren omogen;
- fundație de baraj cu pinten și perete de palplanșe pe teren neomogen.

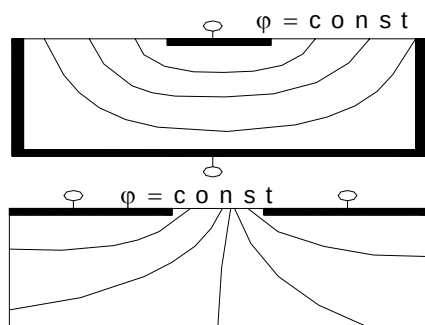


Fig. 30.4. Spectrul hidrodynamic la infiltrația sub radier general

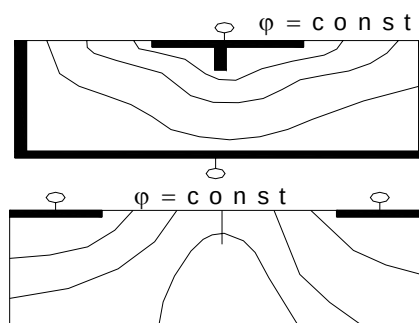


Fig. 30.5. Spectrul hidrodynamic la infiltrația sub radier general cu palplanșă

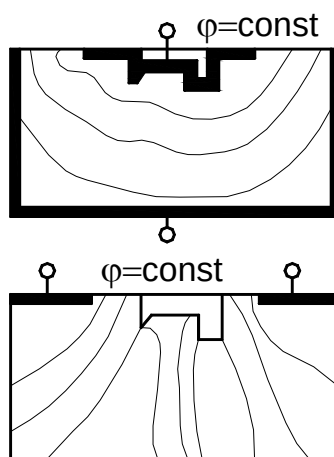


Fig. 30.6. Spectrul hidrodynamic la infiltrația sub fundația unui baraj

La punctul 1 și punctul 2 se folosește ca electrolit apa, iar la punctul 3 se folosește apa cu săruri de concentrație diferită. Terenul de fundație neomogen este modelat prin electrolit cu concentrație diferită.

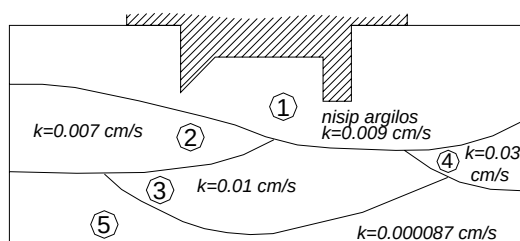


Fig. 30.7. Modelarea terenului de fundație neomogen

Ca electrolit se folosește apa cu:

- 1 – 5 % NaCl
- 2 – 10 % NaCl
- 3 – 25 % NaCl
- 4 – 25 % H_2SO_4
- 5 – 5 % ZnSO_4

30.3. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Aparatul folosit pentru determinări cuprinde: sursa de putere, reostat, voltmetru, miliampermetru, cuva electrolică, electrolitul și electrozii.

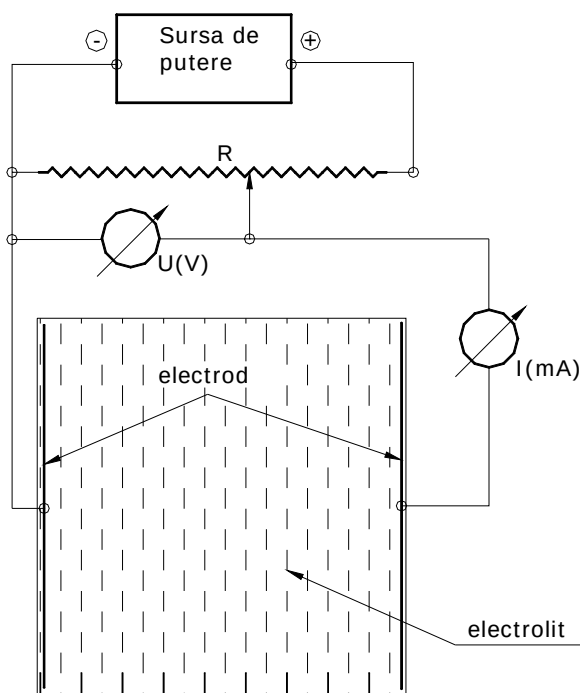


Fig. 30.8. Aparat A. E. H. D.

30.4. MODUL DE LUCRU

Se realizează electrolitul pe model perfect orizontalizat. Se realizează legăturile la conductorii modelului a bornelor aparatului.

Se conectează aparatul la rețeaua electrică de alimentare.

Cu ajutorul sondei se caută punctele pentru care miliampermetrul aparatului arată valoarea zero pentru o anumită poziție a comutatorului cu 11

poziții. (De obicei se vor începe experiențele cu poziția comutatorului la o poziție de mijloc).

Mutând comutatorul în diferite poziții de la 0-11 se vor trasa 10 curbe echipotențiale care corespund liniilor de echipotențial hidraulic, montând conductorii pe model.

Când acul miliampermetrului indică valoare zero de fiecare dată se măsoară coordonatele punctului obținut care va servi la trasarea câmpului hidrodinamic. Trasarea liniilor echipotențiale și de curent se face prin minimul 10 puncte experimentale.

30.5. PRELUCRAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Coordonatele punctelor obținute pentru fiecare linie echipotențială și de curent se trec în tabelul 30.1 pe baza căruia se construiește grafic spectrul hidrodinamic.

Tabel 30.1 Coordonatele liniilor de curent și echipotențiale
(valori experimentale)

Linia nr. coordonate		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Echipotențiale	X										
	Y										
Curent	X										
	Y										

Spectrul hidrodinamic obținut experimental se va compara cu spectrul obținut printr-o metodă teoretică.

BIBLIOGRAFIE

1. Bartha, I., Javgureanu, V. – Hidraulică, vol. 1, Ed. Tehnică, Chişinău, 1998.
2. Bartha, I., Javgureanu, V., Marcoie, N. – Hidraulică, vol. II, Ed. Performantica, Iaşi, ISBN: 9975-910-12-2, 2004.
3. Bărglăzan, A., - Încercările maşinilor hidraulice şi pneumatice, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1959.
4. Blidaru E., Bartha, I., Luca, M., Hidraulică – Îndrumar de laborator, Inst. Polit. „Gh. Asachi” Iaşi, Rotaprint, 1979.
5. Cioc, D. – Hidraulică, Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1983.
6. Gheorghe G., - Măsurarea debitelor de fluide, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1978.
7. Idelcik, I., E., - Îndrumător pentru calculul rezistenţelor hidraulice, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1984.
8. Kiselev, P.G. – Îndreptar pentru calcule hidraulice, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1988.
9. Luca, M. – Hidraulică tehnică, vol. I, Mişcarea permanentă în canale, Ed Tehnopress, Iaşi, 1998.
10. Luca M., Hidraulica construcţiilor hidrotehnice, Ed. Universitatea Tehnică “Gh. Asachi” Iaşi, 1994.
11. Luca, O. – Hidraulica mişcărilor permanente, Ed. H.G.A., Bucureşti, 2000.
12. Marchidanu, E., - Hidrogeologia în ingineria construcţiilor, Ed. Tehnică, 1996.
13. Marinov, A.M. – Hidrodinamica apelor subterane, Ed. Printech, Bucureşti, 2000.
14. Mateescu, C. – Hidraulică, Ed. Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1963.
15. Pietraru, V. – Calculul infiltraţiilor, Ed. Ceres, Bucureşti, 1970.
16. Robescu, D., Petrovici, T., Stamatoiu, D. – Transport de fluide polifazice şi depoluare – Îndrumar de laborator, Inst. Polit. Bucureşti, Rotaprint, 1985.
17. Rumşiski, L., Z., - Prelucrarea matematică a datelor experimentale, Ed. Tehnică, Bucureşti, 1974.
18. Tiron, M., - Teoria erorilor de măsură şi metoda celor mai mici pătrate. Ed. Tehn., Bucureşti, 1970.
19. Tiron, M., - Prelucrarea statistică şi informaţională a datelor de măsurare. Ed. Tehn., Bucureşti, 1976.
20. Vischer, D.L., Hager, W.H. – Energy Dissipators, A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995.

-
21. Vasilescu Al., - Analiza dimensională și teoria similitudinii, Ed. Academia României, București, 1969.
 22. Yalin, M.S. – Fundamentals of Hydraulic Physical Modeling, NATO Modeling, 1988.
 23. * * * *Manualul inginerului hidrotehnician*, vol. I, Ed. Tehnică, București, 1969.
 24. * * * STAS 9488-74, Mecanica fluidelor. Terminologie, simboluri, unități de măsură.
 25. * * * STAS 3061-74, Hidraulică. Terminologie, simboluri, unități de măsură.
 26. * * * STAS 8955-73, Mărimi și constante fizice. Simboluri.
 27. * * * STAS 1295-83, Masă, densitate (masă volumică). Greutate, greutate volumică (greutate specifică). Terminologie, simboluri.
 28. * * * STAS 8972/4-82. Determinarea debitului de apă în sistemele de curgere cu nivel liber. Metoda relației nivel-debit (cheia limnimetrică).

A N E X E

Anexa 1. Unități de măsură.

Anexa 2. Echivalența unităților de măsură a presiunii.

Anexa 3. Densitatea aerului uscat la diferite temperaturi și presiune normală.

Anexa 4. Greutatea specifică, densitatea, viscozitatea și presiunea de vaporizare a apei pentru diferite temperaturi.

Anexa 5. Coeficientul de compresibilitate β și modulul de elasticitate ε pentru apă pură la diferite temperaturi.

Anexa 6. Coeficientul de tensiune superficială σ pentru Apă-aer la diferite temperaturi.

Anexa 7. Coeficientul de tensiune superficială σ pentru câteva lichide în contact cu aerul la 20 °C.

Anexa 8. Viteza sunetului în apă funcție de temperatură.

Anexa 9. Căldura specifică a apei (cal / g).

Anexa 10. Prefixele pentru denumirea multiplilor și submultiplilor zecimali ai unităților

ANEXA 1

UNITĂȚI DE MĂSURĂ

Mărime	Simbol	Ecuatie de definiție	Sistemul de măsură	Dimensiune	Unități
1	2	3	4	5	6
Lungime	L, a, b, c, s	-	SI	L	m
Arie	A	$A=ab$	SI	L^2	m^2
Volum	V	$V=abc$	SI	L^3	m^3
Timp	t	-	SI	T	secunda
Masă	m	-	SI	M	kg
Greutate	G	$G=mg$	SI	LMT^{-2}	N
Unghi plan	A, β, θ	$\theta = \frac{\text{Lungime arc}}{\text{Raza}}$	SI	-	rad
Densitate	ρ	$\rho = \frac{M}{V}$	SI	ML^{-3}	kg / m^3
Viteză	u, v, w, c, V	$V = \frac{ds}{dt}$	SI	LT^{-1}	m / s
Viteză unghiulară	ω	$\omega = \frac{d\theta}{dt}$	SI	T^{-1}	rad / s
Accelerație	a	$a = \frac{dv}{dt}$	SI	LT^{-2}	m / s^2
Forță	F	$F = m \cdot a$	SI CGS MKfs	LMT^{-2} F	$N = m \, kg / s^2$ $dyn = g \, cm / s^2$ kgf
Efort unitar	Σ, τ, p_{ij}	$\sigma = \frac{dF}{dA}$	SI	$L^{-1}MT^{-2}$	N / m^2
Presiune	p	$p = \frac{dF}{dA}$	SI CGS MKfs	$L^{-1}MT^{-2}$ FL^{-2}	N / m^2 dyn / cm^2 kgf / cm^2
Lucru mecanic Energie	L, E, W	$L = Fd$	SI	L^2MT^{-2}	$J = N \cdot m$
Putere	P	$P = \frac{\Delta L}{\Delta t}$	SI	L^2MT^{-3}	W
Greutate specifică	γ	$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta V}$	SI	$L^{-2}MT^{-2}$	N / m^3

ANEXA 1 (continuare)

Mărime	Simbol	Ecuatie de definiție	Sistemul de măsură	Dimensiune	Unități
1	2	3	4	5	6
Viscozitate dinamică	η	$\eta = \frac{\tau}{\frac{dv}{dn}}$	SI	$L^{-1}MT^{-1}$	kg / m·s
Viscozitate cinematică	ν	$\nu = \frac{\eta}{\rho}$	SI	L^2T^{-1}	m ² / s
Debit de volum	Q	$Q = \frac{dV}{dt}$	SI	L^3T^{-1}	m ³ /s

ANEXA 2

ECHIVALENȚA UNITĂȚILOR DE MĂSURĂ A PRESIUNII

UM	N/m ² Pa	bar	m bar	at kgf/cm ²	MN/ m ²	mmH ₂ O kgf/m ²	mm Hg torr	atm
1 N/m ² 1 Pa	1	10 ⁻⁵	10 ⁻²	1,0197·10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	0,10194	7,5·10 ⁻³	0,986·10 ⁻⁵
1 bar	10 ⁵	1	10 ³	1,0197	10 ⁻¹	10994	750	0,9866
1 mbar	10 ²	10 ⁻³	1	1,019·10 ⁻³	10 ⁻⁴	10,194	0,75	0,986·10 ⁻³
1 kgf/cm ² 1 at	98066,5	0,981	0,9807·10 ³	1	0,0981	10000	735,7	0,968
1 MN/m ²	10 ⁶	10	10 ⁴	10,197	1	101937	7,5·10 ³	9,866
1mmH ₂ O 1 kgf/m ²	9,807	9,807·10 ⁻⁵	9,807·10 ⁻²	10 ⁻⁴	9,81·10 ⁻⁶	1	7,357·10 ⁻²	9,68·10 ⁻⁵
1mmHg 1 torr	133,3	1,333·10 ⁻³	1,33	1,359·10 ⁻³	1,33·10 ⁻⁴	13,595	1	1,316·10 ⁻³
1 atm	101325	1,013	1013	1,0332	0,101	10332	760	1

ANEXA 3

**DENSITATEA AERULUI USCAT LA DIFERITE
TEMPERATURI ȘI PRESIUNE NORMALĂ**

Temperatura (°C)											
-20	-10	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
—	—	999,9	1000	999,7	998,2	995,7	992,2	988,1	983,2	971,8	958,4
1,395	1,342	1,293	1,274	1,247	1,205	1,165	1,128	1,093	1,060	1,000	0,946

ANEXA 4

**GREUTATEA SPECIFICĂ, DENSITATEA, VISCOZITATEA ȘI PRESIUNEA
DE VAPORIZARE A APEI PENTRU DIFERITE TEMPERATURI**

T °C	γ N / m ³	ρ Kg / m ³	p _{vap} mmHg	η Ns/m ² x 10 ⁶	10 ⁻⁶ · ν (m ² / s)
0	9808,7	999,87	4,58	182,9	1,794
4	9810,0	1000,00	6,10	159,0	1,560
6	9809,7	999,97	7,01	149,8	1,470
8	9808,8	999,88	8,05	141,7	1,390
10	9807,4	999,73	9,21	133,5	1,316
12	9805,3	999,52	10,52	126,4	1,241
14	9802,8	999,27	11,99	119,3	1,171
16	9799,9	998,97	13,63	113,1	1,111
18	9796,5	998,62	15,48	108,1	1,061
20	9792,6	998,23	17,54	103,0	1,012
22	9788,4	997,80	19,83	97,9	0,962
24	9783,7	997,32	23,38	92,8	0,912
26	9778,7	996,81	25,21	89,1	0,877
28	9773,3	996,26	28,35	85,2	0,839
30	9767,5	995,67	31,82	81,7	0,804
40	9730,1	991,86	55,32	66,9	0,661
50	9693,0	988,07	92,51	56,0	0,556
60	9645,6	983,24	149,38	47,8	0,477
70	9592,3	977,81	233,71	41,4	0,415
80	9533,7	971,83	355,12	36,4	0,367
90	9470,0	965,34	525,76	32,3	0,328
100	9400,9	958,30	760,00	29,0	0,296

ANEXA 5

COEFICIENTUL DE COMPRESIBILITATE β ȘI MODULUL DE ELASTICITATE ε PENTRU APĂ PURĂ LA DIFERITE TEMPERATURI

Temperatura t (°C)	Coeficientul de compresibilitate β (m^2 / N)	Modulul de elasticitate ε (N / m^2)
0	$5,12 \cdot 10^{-10}$	$1,95 \cdot 10^9$
10	$4,88 \cdot 10^{-10}$	$2,05 \cdot 10^9$
20	$4,68 \cdot 10^{-10}$	$2,14 \cdot 10^9$
30	$4,63 \cdot 10^{-10}$	$2,16 \cdot 10^9$
40	$4,61 \cdot 10^{-10}$	$2,17 \cdot 10^9$
50	$4,59 \cdot 10^{-10}$	$2,18 \cdot 10^9$
60	$4,57 \cdot 10^{-10}$	$2,19 \cdot 10^9$

ANEXA 6

COEFICIENTUL DE TENSIUNE SUPERFICIALĂ σ PENTRU APĂ-AER LA DIFERITE TEMPERATURI

t_s (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
σ , (N/m)	0,0756	0,0749	0,0743	0,0729	0,0712	0,0697	0,0677	0,0663	0,0626	0,0589

ANEXA 7

COEFICIENTUL DE TENSIUNE SUPERFICIALĂ σ PENTRU CÂTEVA LICHIDE ÎN CONTACT CU AERUL LA 20°C.

Lichidul	Coeficientul de tensiune superficială σ (N / m)
Apă	0,0729
Mercur	0,515
Benzină	0,0289
Alcool etilic	0,0224
Ulei	0,035 ... 0,039
Petrol lampant	0,023 ... 0,039

ANEXA 8

VITEZA SUNETULUI ÎN APĂ FUNCȚIE DE TEMPERATURĂ

Nr. crt.	T (°C)	C (m / s)
1	13	1440
2	19	1460
3	31	1500

ANEXA 9

CĂLDURA SPECIFICĂ A APEI (cal / g)

Topire	79,7
Vaporizarea	539,6

ANEXA 10

PREFIXELE PENTRU DENUMIREA MULTIPLILOR ȘI
SUBMULTIPLILOR ZECIMALI AI UNITĂȚILOR

Factor	Prefix	Notăție
10^{12}	Tera	
10^9	Giga	
10^6	Mega	
10^3	Kilo	
10^2	Hecto	
10^1	Deca	
10^{-1}	Deci	
10^{-2}	Centi	
10^{-3}	Mili	
10^{-6}	Micro	
10^{-9}	Nano	
10^{-12}	Pico	